

Treball de Fi de Grau

## **Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials**

### **Dimensionat d'una microxarxa elèctrica aïllada**

#### **MEMÒRIA**

**Autor:** Maria del Mar Revilla Sancho  
**Director:** Oriol Gomis Bellmunt  
**Convocatòria:** Juny 2019



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## **Resum**

La transició energètica cap a un model més sostenible passa per integrar fonts d'energia renovables a les xarxa. L'objectiu d'aquest treball és desenvolupar un programa per dimensionar una microxarxa elèctrica aïllada amb una font fotovoltaica i una eòlica.

Primerament s'ha modelitzat amb operadors lògics per realitzar diverses simulacions. A continuació, s'ha modelitzat matemàticament amb equacions i per mitjà d'un algoritme d'optimització s'ha dimensionat la microxarxa per obtenir el mínim cost de la instal·lació, subministrant la demanda requerida. Finalment, s'ha millorat el programa tenint en compte el rendiment del convertidor.

## **Paraules clau**

Microxarxa, modelització, simulació, programació lineal, optimització, MATLAB

# SUMARI

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. GLOSSARI</b>  | <b>9</b>  |
| <b>2. PREFACI</b>   | <b>10</b> |
| 2.1. Origen del projecte.....                                 | 10        |
| 2.2. Motivació.....   | 10        |
| 2.3. Requeriments previs.....                                 | 10        |
| <b>3. INTRODUCCIÓ</b>   | <b>11</b> |
| 3.1. Objectius del projecte .....                             | 11        |
| 3.2. Abast del projecte .....                                 | 11        |
| 3.3. Metodologia .....  | 11        |
| <b>4. ESTAT DE L'ART</b>                                      | <b>12</b> |
| <b>5. MARC TEÒRIC</b>   | <b>13</b> |
| 5.1. L'energia fotovoltaica .....                             | 13        |
| 5.2. L'energia eòlica.....                                    | 14        |
| 5.3. Convertidors.....  | 15        |
| 5.4. Emmagatzematge de l'energia .....                        | 15        |
| <b>6. MODELITZACIÓ DEL SISTEMA</b>                            | <b>17</b> |
| 6.1. Descripció del sistema .....                             | 17        |
| 6.2. Descripció del programa.....                             | 17        |
| 6.3. Gestió de la bateria i el convertidor.....               | 18        |
| 6.4. Resultats .....  | 18        |
| <b>7. OPTIMITZACIÓ</b>  | <b>22</b> |
| 7.1. Descripció matemàtica del model.....                     | 22        |
| 7.2. Descripció del programa .....                            | 23        |
| 7.3. Resultats .....  | 25        |
| 7.4. Comparativa entre la Modelització i l'Optimització ..... | 28        |
| <b>8. MILLORA DE L'OPTIMITZACIÓ</b>                           | <b>29</b> |
| 8.1. Descripció matemàtica del model.....                     | 29        |
| 8.2. Resultats .....  | 29        |
| 8.3. Comparativa entre versions de l'Optimització.....        | 32        |
| <b>9. CAS AMB RENDIMENT DEL CONVERTIDOR</b>                   | <b>33</b> |
| 9.1. Descripció matemàtica del model.....                     | 33        |

|  |           |
|--|-----------|
| 9.2. Resultats per diferents rendiments..... | 34        |
| 9.3. Comparativa econòmica.....              | 38        |
| <b>CONCLUSIONS .....</b>                     | <b>39</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>                    | <b>40</b> |
| Referències bibliogràfiques.....             | 40        |
| Bibliografia complementària.....             | 41        |
| <b>10. ANNEX A .....</b>                     | <b>42</b> |
| <b>11. ANNEX B .....</b>                     | <b>46</b> |
| 11.1. MatrixLin03.....                       | 46        |
| 11.2. MatrixLin07 .....                      | 49        |
| 11.3. Altres versions desenvolupades.....    | 52        |
| 11.4. MatrixLin71 .....                      | 53        |
| <b>12. ANNEX C .....</b>                     | <b>57</b> |
| <b>13. ANNEX D .....</b>                     | <b>60</b> |
| 13.1. Descripció matemàtica del model .....  | 60        |
| 13.2. Resultats.....                         | 60        |
| 13.3. MatrixLin31 .....                      | 65        |

# Índex de Figures

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 Gràfica Intensitat-Voltatge d'una cel·la fotovoltaica .....                     | 13 |
| Figura 2 Esquema del sistema a estudiar .....  | 17 |
| Figura 3 Potència del convertidor en un any .....  | 19 |
| Figura 4 Potència del convertidor durant la primera setmana .....                        | 19 |
| Figura 5 Energia de la bateria en un any.....  | 20 |
| Figura 6 Energia de la bateria durant la primera setmana.....                            | 20 |
| Figura 7 Generació i demanda en un any .....   | 21 |
| Figura 8 Generació i demanda durant la primera setmana .....                             | 21 |
| Figura 9 Potència del convertidor en un any .....  | 26 |
| Figura 10 Potència del convertidor durant la primera setmana .....                       | 26 |
| Figura 11 Energia de la bateria en un any.....   | 27 |
| Figura 12 Energia de la bateria durant la primera setmana.....                           | 27 |
| Figura 13 Potència del convertidor en mig any .....                                      | 30 |
| Figura 14 Potència del convertidor durant la primera setmana .....                       | 30 |
| Figura 15 Energia de la bateria en mig any.....  | 31 |
| Figura 16 Energia de la bateria durant una setmana .....                                 | 31 |
| Figura 17 Potència del convertidor en mig any per un rendiment del 90 %.....             | 35 |
| Figura 18 Potència del convertidor durant la primera setmana per un rendiment del 90 %.. | 35 |
| Figura 19 Energia de la bateria en mig any per un rendiment del 90 % .....               | 36 |
| Figura 20 Energia de la bateria durant la primera setmana per un rendiment del 90 %..... | 36 |
| Figura 21 Potència no utilitzada en mig any per un rendiment del 99,99 % .....           | 37 |
| Figura 22 Potència no utilitzada en mig any per un rendiment del 90 % .....              | 37 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 23 Potència no utilitzada en mig any per un rendiment del 80 % .....              | 37 |
| Figura 24 Potència del convertidor en mig any per un rendiment del 80 %.....             | 57 |
| Figura 25 Potència del convertidor durant la primera setmana per un rendiment del 80 %.. | 57 |
| Figura 26 Energia de la bateria en mig any per un rendiment del 80 % .....               | 58 |
| Figura 27 Energia de la bateria durant la primera setmana per un rendiment del 80 %..... | 58 |
| Figura 28 Generació i demanda en mig any per un rendiment del 80 %.....                  | 59 |
| Figura 29 Generació i demanda durant la primera setmana per un rendiment del 80 %.....   | 59 |
| Figura 30 Potència del convertidor en mig any per un rendiment del 80 %.....             | 61 |
| Figura 31 Potència del convertidor durant la primera setmana per un rendiment del 80 %.. | 61 |
| Figura 32 Energia de la bateria en mig any per un rendiment del 80 % .....               | 62 |
| Figura 33 Energia de la bateria durant la primera setmana per un rendiment del 80 %..... | 62 |
| Figura 34 Generació i demanda en mig any per un rendiment del 80 %.....                  | 63 |
| Figura 35 Generació i demanda durant la primera setmana per un rendiment del 80 %.....   | 63 |
| Figura 36 Potència no utilitzada en mig any per un rendiment del 80 % .....              | 64 |

## Índex de Taules

|   |    |
|---|----|
| Taula 1 Dimensionat Modelització per un any .....   | 18 |
| Taula 2 Dimensionat de l'Optimització per un any.....   | 25 |
| Taula 3 Compartiva del dimensionat en un any .....  | 28 |
| Taula 4 Dimensionat de l'Optimització millorat per mig any .....  | 29 |
| Taula 5 Comparativa del dimensionat per dues versions d'Optimització en mig any .....                       | 32 |
| Taula 6 Comparativa del dimensionat per diferents rendiments en mig any .....                               | 34 |
| Taula 7 Comparativa entre el dimensionat i resultats pels diferents programes desenvolupats en mig any..... | 52 |
| Taula 8 Comparativa del dimensionat per diferents rendiments en mig any .....                               | 60 |



## 1. Glossari

|      |  |
|------|--|
| UE   | Unió Europea                                 |
| TFG  | Treball Final de Grau                        |
| PMP  | Punt de Màxima Potència                      |
| SoC  | <i>State of Charge</i> , estat de càrrega    |
| AC   | <i>Alternating Current</i> , corrent alterna |
| DC   | <i>Direct Current</i> , corrent contínua     |
| IGBT | <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>     |
| VSC  | <i>Voltage Source Converter</i>              |
| LCC  | <i>Line-Commuted Converter</i>               |
| LCOE | <i>Levelized Cost of Energy</i>              |

## 2. Prefaci

### 2.1. Origen del projecte

La producció mundial d'energia de fonts renovables se situa al 13,6 % [1] respecte al total. Aquesta xifra va en augment, mentre que la tendència en la producció a partir dels combustibles fòssils disminueix. Diversos organismes públics promouen l'evolució cap a un model energètic amb menys emissions de carboni. Per exemple, la Unió Europea (UE) ha fixat per objectiu consumir com a mínim un 20% [1] d'energia de fonts renovables el 2020. Aquest propòsit no es fonamenta en raons únicament ambientals, sinó que a més a més es pretén disminuir la dependència energètica de l'exterior de la UE [2].

En aquest context, les microxarxes tenen un paper fonamental. Es podrien definir com un grup interconnectat de càrregues i recursos energètics clarament definits que actuen com una única entitat controlable. Les microxarxes poden estar connectades a la xarxa general o bé estar aïllades com és el cas del present Treball [3].

D'aquesta manera, s'aconsegueix apropar les fonts d'energia al consumidor final i proporcionar energia neta de fonts renovables. A més a més, redueixen la congestió de la xarxa, minimitzen el consum total d'energia i permeten un control més acurat del voltatge i dels sistemes de seguretat [4].

### 2.2. Motivació

L'autora té un interès particular en aprofitar millor els recursos dels quals es disposa ja des del batxillerat, en què va realitzar el treball de recerca sobre l'eficiència energètica a la llar. Fent un pas endavant, era el moment d'aprendre més sobre com es regula la generació i el consum de l'electricitat.

Per altra banda, també es va buscar un Treball Final de Grau (TFG) que fos una síntesis de les assignatures que més havien agradat del Grau amb la intenció d'aprofundir en les àrees d'interès.

### 2.3. Requeriments previs

Per desenvolupar aquest projecte han estat útils els coneixements de MATLAB adquirits durant el Grau.

## 3. Introducció

### 3.1. Objectius del projecte

Per realitzar el treball d'una manera lògica i ordenada s'han fixat els següents objectius:

- Estudi de la generació i l'emmagatzematge d'energia.
- Disseny d'un programa informàtic que permeti simular com canvien els resultats finals en funció del dimensionat inicial.
- Modelització per mitjà d'equacions del funcionament del sistema.
- Optimització del resultats amb un algoritme específic.
- Millora de de la modelització per tal fer-lo més assemblat a la realitat.

Tot això amb la finalitat d'enriquir els coneixements de l'autora en el camp de la gestió energètica.

### 3.2. Abast del projecte

El problema a modelitzar consta de dues fonts d'energia renovables, un sistema d'emmagatzematge d'energia basat en una bateria i un convertidor i un consum. L'objectiu principal és modelitzar i optimitzar la gestió de la potència de la microxarxa per tal de dimensionar la potencia instal·lada a ambdues fonts, la potència màxima que regula el convertidor i la capacitat de la bateria. Assegurant sempre el subministrament de la potència que es requereix i minimitzant el cost. S'ha inclòs un apartat per modelitzar el rendiment del convertidor.

### 3.3. Metodologia

La realització del TFG ha comportat un recerca bibliogràfica per emmarcar el projecte. En concret de les variables que es desitgen optimitzar, és a dir, la generació i l'emmagatzematge d'energia.

Les dades de partida del projecte han estat proporcionades pel professorat. El tractament de les dades s'ha realitzat amb MATLAB i programes d'ofimàtica.

Primerament s'ha realitzat un programa per arribar a un òptim per mitjà de simulacions. A base de canviar les dades a dimensionar i observar els resultats de la demanda no satisfeta i la energia sobrant s'ha anat acotant la cerca de l'òptim.

Una vegada entès com funciona el sistema s'ha passat a modelitzar-lo per mitjà d'equacions i a optimitzar-ne els resultats.

## 4. Estat de l'art

Existeixen nombroses publicacions sobre la producció d'energia fotovoltaica i eòlica i el seu emmagatzematge. En aquest treball era necessària una primera aproximació en aquests temes. Especialment útil ha estat *Energia solar fotovoltaica*, elaborat per l'Institut Català d'Energia de la Generalitat de Catalunya en què es posa a l'abast dels lectors els components i esquemes bàsics a més del dimensionat d'instal·lacions fotovoltaïques. S'ha posat èmfasis en detallar els fonaments electrònics, explicats per Einstein i Millikan.

Sobre l'energia associada a la velocitat del vent ja fa molt temps que la humanitat se n'aprofita. Des dels molins per moldre el gra i bombejar aigua fins a la producció d'electricitat. El disseny i construcció dels aerogeneradors ha anat evolucionant i diversificant-se, encara que el disseny actual dominant està format per tres pales. Tot i les reticències de la societat a causa al soroll de les turbines i l'impacte visual, aquest sector no s'enfronta a grans obstacles. Mentre la grandària de les turbines sembla a estabilitzar-se, els últims esforços en investigació van encaminats a disminuir els costos de les plantes *offshore*, o mar endins, derivats de la construcció dels fonaments i la connexió a la xarxa. També s'estan estudiant millores per tal d'integrar millor l'electricitat, ja que part de la problemàtica es deu a la intermitència del vent [5].

Aquest treball no pretén estendre's en les diverses tipologies dels convertidors. En relació al seu paper en les microxarxes es pot consultar el *Microgrid Power Electronic Converters: State of Art and Future Challenges* [6].

En aquests moments, l'emmagatzematge d'energia en bateries s'enfronta al repte de disminuir el seu cost, a més de les particularitats pròpies de cada tipus de bateria. N'hi ha de diferents tipus destinades a aplicacions concretes. S'ha consultat el llibre *Energy in Power Systems* on s'expliquen de manera més extensa.

Pel que fa a la modelització i simulació de la microxarxa diversos articles proposen un estudi en profunditat en MATLAB/SIMULINK, com l'article d'en Abdul, H. *Use of photovoltaics in microgrid as energy*. I, sobretot, ha ajudat *Modelling and Optimization in Microgrids* a entendre bé com es relacionen les diferents parts de la microxarxa.

## 5. Marc teòric

### 5.1. L'energia fotovoltaica

L'energia fotovoltaica és la manera d'obtenir energia solar a partir de panells formats per cel·les fotovoltaiques col·locades en sèrie i en paral·lel.

El fenomen conegut com a "efecte fotovoltaic" té lloc a les cel·les fotovoltaiques. Quan la radiació solar incideix a la cel·la, l'energia dels electrons de l'última capa de valència del material semiconductor augmenta, de manera que si se supera un cert llindar d'energia, (energia de *gap*) l'electró queda alliberat de l'enllaç de valència.

Les cel·les estan formades per dues capes de material semiconductor, usualment silici. Generalment la part superior és de tipus n i la resta és de tipus p, és a dir, a la part superior hi ha un excés d'electrons mentre que a la part inferior n'hi ha un defecte. A la regió frontera anomenada junció pn es produeixen desplaçaments dels portadors de càrrega que crea un camp elèctric de la regió n a la regió p.

Les cel·les incorporen contactes elèctrics per poder canalitzar l'energia. A la part superior són ramificats per poder captar millor els electrons fent l'ombra mínima, mentre que a la part inferior els contactes poden formar una làmina. L'objectiu és fer un bon contacte elèctric de baixa resistivitat. Per tal d'aprofitar al màxim la radiació incident, a la part superior de la cel·la hi ha una capa antireflectant.

El voltatge i la intensitat entregats a la xarxa té un comportament com l'indicat a la Figura 1.

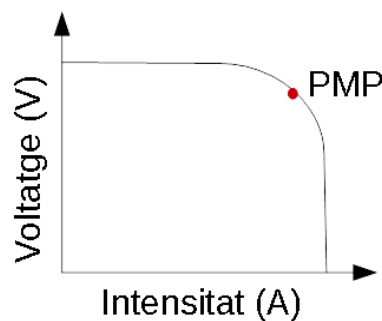


Figura 1 Gràfica Intensitat-Voltatge d'una cel·la fotovoltaica

La corba varia en funció d'alguns paràmetres, com la temperatura ambient o la radiació solar. Si es té en compte que el corrent obtingut a la cel·la és corrent continu, la potència obtinguda ve donada pel producte de la parella de valors I-V.

La màxima potència que es pot extreure de la cel·la correspon a una tensió i a un corrent concret, el punt de màxima potència (PMP). Aquest punt varia segons les condicions de funcionament.

Pel que fa a la ubicació dels panells, els paràmetres més importants són la superfície disponible, l'orientació i inclinació, la càrrega estructural que pot suportar i la incidència d'ombres que pot tenir. Un disseny i muntatge acurat permet reduir el cost total i maximitzar-ne el benefici [7].

Les connexions dels panells poden ser en sèrie o en paral·lel o bé una combinació. S'ha de tenir en compte que els mòduls interconnectats han de tenir les mateixes corbes I-V per evitar pèrdues de rendiment del conjunt i descompensacions. Si alguna de les connexions falla per algun motiu, el panell es convertiria en una càrrega resistiva. Amb la intenció d'evitar pèrdues per efecte Joule i millorar el rendiment de la instal·lació es posen díodes en paral·lel als borns del panell de manera que només condueixin en cas de fallada del panell.

## 5.2. L'energia eòlica

El vent es produeix a causa de la diferència de pressió entre les masses d'aire. El moviment de l'aire depèn de múltiples factors, per exemple de la latitud que està relacionada amb la radiació solar i per tant amb la temperatura i la densitat de l'aire. En una mateixa zona climàtica també hi ha condicionants geogràfics que afavoreixen la generació de vent com és el cas de zones muntanyoses o costeres.

L'energia eòlica consisteix en l'aprofitament de la velocitat del vent per generar energia elèctrica. L'element principal és l'aerogenerador, que transforma l'energia cinètica del vent en electricitat.

Els aerogeneradors més usats per produir energia elèctrica són d'eix horitzontal. Es poden distingir diversos subsistemes:

- El rotor, format per varies pales unides per una peça comuna anomenada boixa. Converteix l'energia cinètica en energia mecànica de rotació. A nivell mundial dominen els aerogeneradors tripales, ja que tenen menys oscil·lacions i millor equilibri de les forces giroscòpiques i produeixen menys impacte sonor. Les pales estan construïdes amb materials lleugers i resistents com fibra de vidre amb resines epòxiques o fibra de carboni.
- La gòndola és el receptacle on s'ubica la caixa multiplicadora de velocitat de rotació, el generador elèctric i els sistemes de control, orientació i frenada. A la part posterior se situa un anemòmetre i un penell que mesuren la velocitat i la direcció del vent.
- La caixa multiplicadora de velocitat està formada per un tren d'engranatges. La relació de transmissió fa augmentar la velocitat de l'eix de gir connectat al generador respecte l'eix del costat de les pales, per poder adequar la freqüència de l'electricitat. L'eix d'alta velocitat està proveït d'un fre mecànic de disc que s'utilitza en cas d'emergència o

durant les tasques de manteniment.

- Per la generació elèctrica es poden utilitzar tant generadors síncrons com asíncrons. En tots dos casos l'electricitat produïda és alterna trifàsica i en general a baixa tensió.

Pel que fa a l'orientació del rotor, per optimitzar l'aprofitament de l'energia, el pla de rotació ha de mantenir-se perpendicular a la direcció del vent. Hi ha dues maneres de col·locar el rotor respecte a la torre, o davant (*upwind*) o darrere la torre (*downwind*), essent la orientació *upwind* més freqüent. El principal avantatge és que la càrrega a la fatiga es redueix degut a què minimitza l'ombra de la torre sobre les pales del rotor. A més, provoca menys oscil·lacions del parell motor i redueix el soroll aerodinàmic. El principal desavantatge és que no és auto-orientable i per tant, ha d'incorporar algun sistema d'orientació [8].

### 5.3. Convertidors

Els convertidors de potència bidireccionals AC-DC són fonamentals en la regulació de l'emmagatzematge d'energia a les microxarxes [9]. Les plantes fotovoltaïques un inversor DC-AC per injectar la corrent a la xarxa i les turbines eòliques que generen corrent altern necessiten dos convertidors de potència AC-DC.

Tenint en compte el tipus de semiconductor utilitzat es poden distingir:

- Convertidors basats en transistors bipolars de porta aïlla (IGBT) o tecnologies similars que permeten la commutació i modulació del voltatge d'una manera ràpida. Formen part dels anomenats VSC, que controlen de manera diferenciada la potència activa i reactiva. L'elevada freqüència de commutació en què operen produeix pèrdues elevades.
- Els inversors basats en trístors o tecnologies similars s'anomenen LCC i poden controlar la potència activa mentre es consumeix reactiva no controlable. Necessiten operar en la xarxa i grans filtres a causa dels harmònics que generen. Es poden disposar en instal·lacions d'alt voltatge i potència i a més produeixen menys pèrdues, ja que commuten a freqüències més baixes.

### 5.4. Emmagatzematge de l'energia

La manera més convencional d'emmagatzemar l'energia és mitjançant bateries. Aquestes, transformen l'energia elèctrica en potencial mentre es carreguen, i viceversa mentre es descarreguen. Estan basades en les reaccions d'oxidació i reducció o redox que consisteix en el procés de pèrdua o guany d'electrons respectivament. Les bateries propicien el flux d'electrons i ions entre les substàncies involucrades[10]. Els seus components principals són:

- Els elèctrodes, formats pel parell ànode i càtode. A l'ànode es produeix l'oxidació mentre que al càtode la reducció.
- Dues substàncies amb facilitat per guanyar i perdre electrons.

- La solució electrolítica que garanteix el transport dels ions de manera que s'asseguri l'equilibri de les càrregues.
- Un separador que eviti el contacte entre l'ànode i el càtode, ja que existeix una diferència d'energia potencial entre elles.
- Tot això contingut en un receptacle on les bateries estan connectades en sèrie o en paral·lel per tal d'aconseguir les característiques desitjades en un ambient aïllat, però controlable.

Durant el procés de descàrrega, els electrons provinents de l'oxidació a l'ànode circulen pel circuit exterior. El flux dels electrons s'inverteix a durant el procés de càrrega de la bateria. El SoC o *State of Charge*. És la relació entre l'energia restant i la capacitat nominal de la bateria.

Existeixen diferents tipus de bateries més o menys adequades per l'aplicació final.

Les bateries de plom-àcid basen la seva tecnologia en la utilització del diòxid de plom com a substància activa del càtode i plom metàl·lic en una superfície porosa en l'ànode amb la solució d'àcid sulfúric. Tenen un cost baix, però presenten el menor cicle de vida i s'ha de realitzar un manteniment periòdic.

En general, les bateries de níquel tenen una bona resistència, ja que es poden deixar descarregades durant llargs períodes sense que pateixin danys permanents. També ofereixen un bon rendiment a temperatures elevades. Com a contrapartida són cares i segons quines combinacions com les de níquel-cadmi tòxiques.

Les bateries a base de sodi tenen una alta densitat d'energia i un cicle de vida llarg. A més, poden operar en ambients hostils, des de temperatures a -40 °C fins a +60°C [11]. L'elevada eficiència energètica, la baixa taxa d'autodescàrrega i el poc manteniment fa que siguin molt convenients per aplicacions d'alta potència. Encara és necessària I+D extensiva per superar problemes com les esquerdes del tub electrolític ceràmic i la corrosió deguda al sofre.

Per últim, les bateries de liti, que actualment estan en el punt de mira en el camp de l'electromobilitat i la generació d'energia renovable i són dominants en aplicacions portables. Els principals avantatges són una alta capacitat de càrrega i descàrrega a més de tenir una densitat d'energia molt elevada.



## 6. Modelització del sistema

### 6.1. Descripció del sistema

El sistema a estudiar consta de dues fonts d'energia, una fotovoltaica i l'altra eòlica, un sistema d'emmagatzematge d'energia basat en un convertidor que regula el flux de potència i una bateria. Tot això alimenta una determinada càrrega, que és la demanda de potència.

L'objectiu és dimensionar la potència fotovoltaica (PPV) i eòlica (PWT) instal·lada, la potència màxima del convertidor ( $P_{convmax}$ ) i la capacitat màxima que pot emmagatzemar la bateria ( $E_{batmax}$ ).

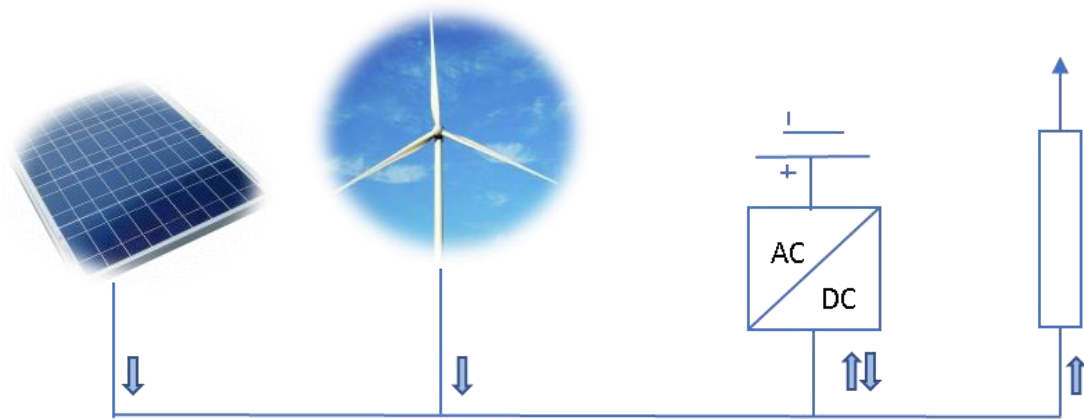


Figura 2 Esquema del sistema a estudiar

Els sistemes d'electrònica de potència que regulen el flux d'electricitat de la font fotovoltaica i eòlica s'han considerat integrats a la generació d'ambdues fonts. Les pèrdues de potència de la xarxa, al convertidor i l'autodescàrrega de la bateria no s'han tingut en compte.

### 6.2. Descripció del programa

Les dades de partida emmagatzemades a dat1.mat són el rati de l'actual potència que genera la planta fotovoltaica i la planta eòlica entre la potència màxima instal·lada respectivament. També es proporciona el rati entre la demanda actual i el pic de potència que es suposa constant a 4 kW. Les dades són d'una mostra per cada hora durant tot un any.

El cost per Watt de la potència fotovoltaica i eòlica instal·lada, el cost per Watt del convertidor i el cost per Wh de la bateria també són dades. La funció a minimitzar és el cost total. Aquesta dada econòmica s'acompanya del LCOE o el cost de l'energia uniformitzat que mesura en tota la vida útil el cost total entre l'energia requerida. S'ha fixat la vida útil a 10 anys.

### 6.3. Gestió de la bateria i el convertidor

Si es genera més potència de la que es necessita consumir, la potència que no es requereix s'emmagatzema sempre que hi càpiga a la bateria. El que no es pogués emmagatzemar perquè la bateria estigués plena es podria llençar o bé es podria generar la potència fotovoltaica per sota de la producció màxima per evitar llençar-la.

Si s'ha de consumir més potència de la que es genera el què falta per subministrar s'extreu de la bateria sempre que la bateria emmagatzemi un mínim d'energia establert. En aquest cas el mínim s'ha fixat en un 20% de la capacitat màxima.

En cap cas es pot sobrepassar la potència màxima que regula el convertidor. El convertidor restringiria el valor al màxim que pot regular (en valor absolut).

El criteri de signes que s'ha seguit és per entrades de potència al sistema bateria i convertidor, valors de potència positius. Per sortides, valors negatius.

Aquest és el punt clau per poder dimensionar correctament la microxarxa.

### 6.4. Resultats

Una vegada modelitzada la regulació de l'energia a la bateria i la potència del convertidor s'han introduït diversos valors de les variables a dimensionar assegurant el subministrament de tota la potència que necessita la demanda. Les simulacions s'han dut a terme procurant minimitzar el cost. A l'Annex A es detalla el codi del programa i les simulacions.

Els valors que han donat un cost mínim en el programa taskassignment2b02 han sigut:

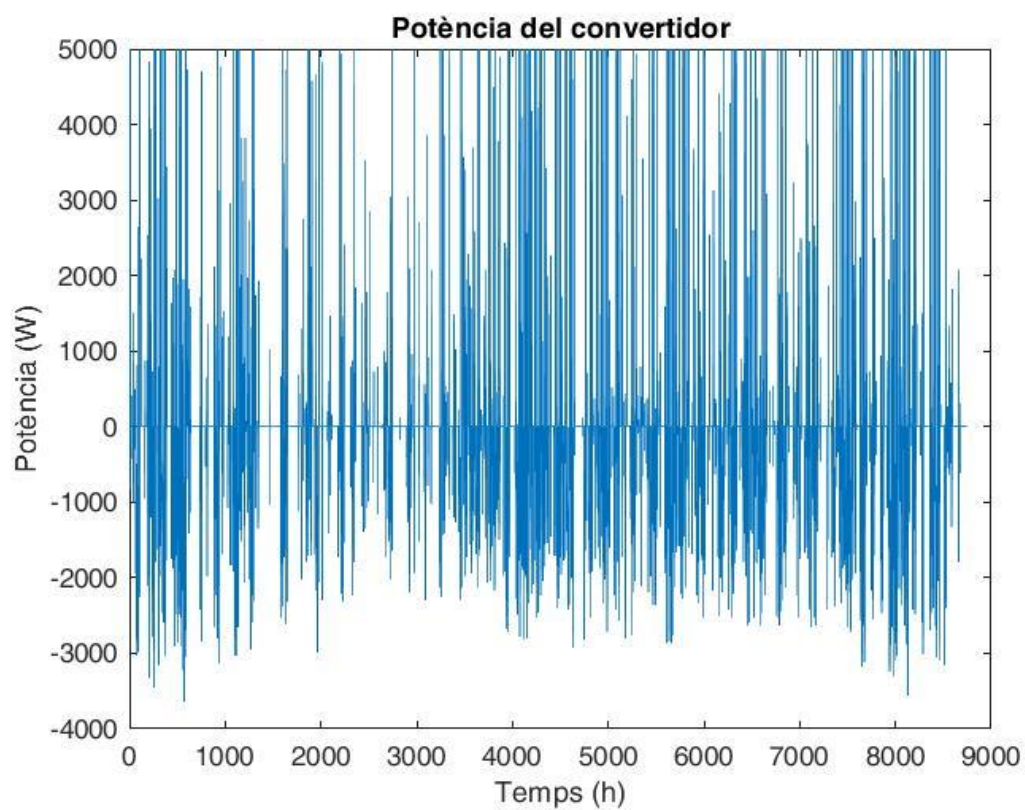
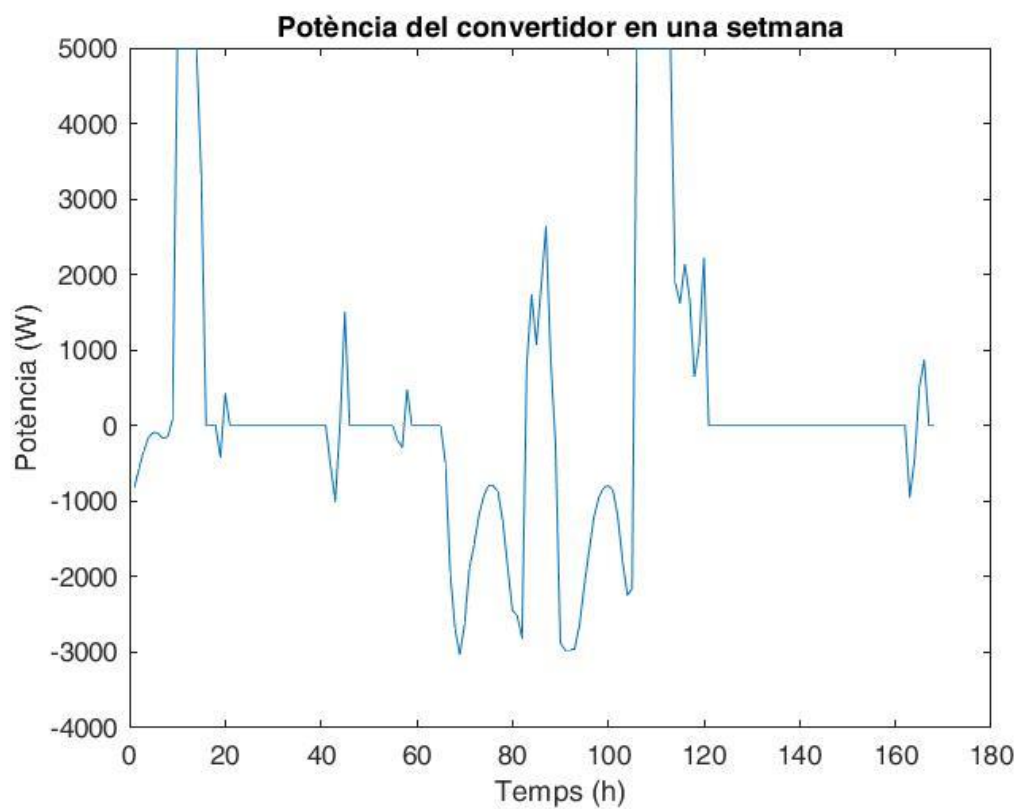
| Potència fotovoltaica (kW) | Potència eòlica (kW) | Potència màxima convertidor (kW) | Energia màxima bateria (kWh) |
|----------------------------|----------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 30                         | 14                   | 5                                | 65                           |

Taula 1 Dimensionat Modelització per un any

El cost del sistema seria de 77,75 k€ i una LCOE de 489,28 €/MWh. Amb aquest valors, sobraria 51336,67 kW durant tot l'any.

El cost unitari que més influeix sobre el total és l'imputat en la generació d'energia eòlica. També s'ha vist que restringint el valor de la potència màxima del convertidor a valors baixos s'aconseguia disminuir el cost sense que aquest fet fos rellevant per a la satisfacció de la demanda.

A continuació es mostra l'evolució d'algunes variables importants del sistema.

*Figura 3 Potència del convertidor en un any**Figura 4 Potència del convertidor durant la primera setmana*

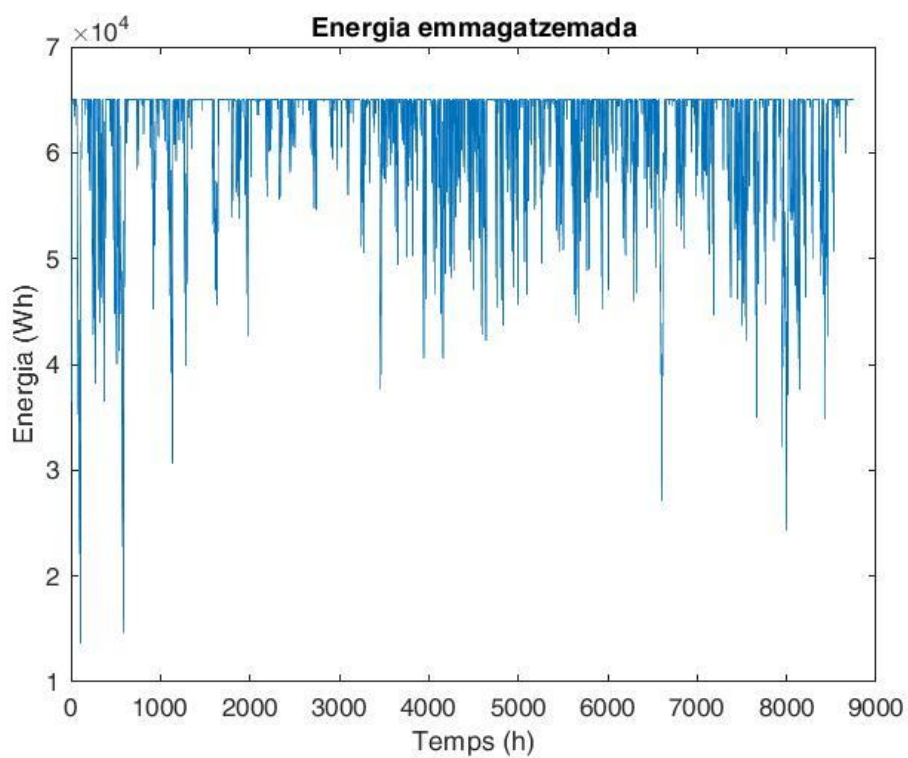


Figura 5 Energia de la bateria en un any

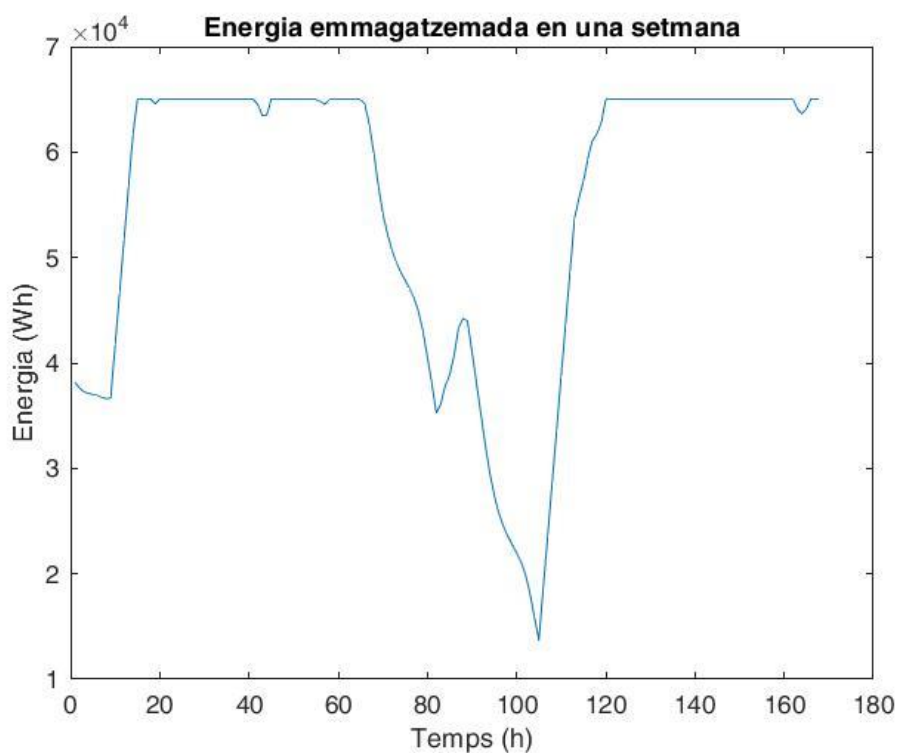
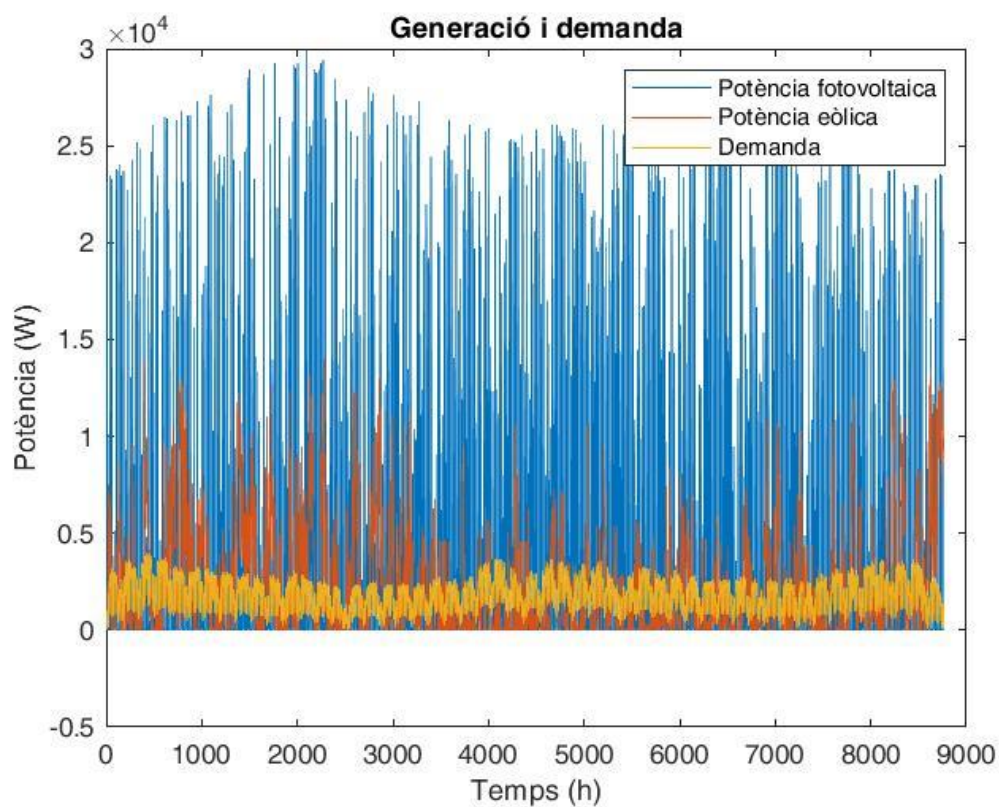
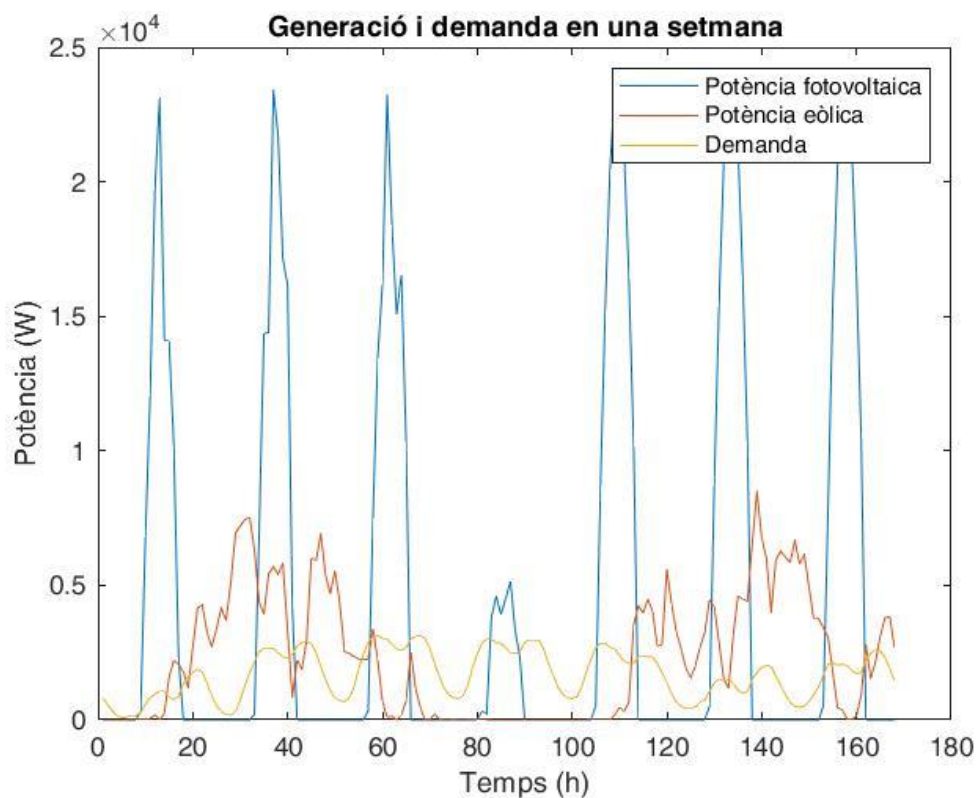


Figura 6 Energia de la bateria durant la primera setmana

*Figura 7 Generació i demanda en un any**Figura 8 Generació i demanda durant la primera setmana*

## 7. Optimització

### 7.1. Descripció matemàtica del model

Una vegada modelitzat el sistema i dimensionat a base de fer diferents simulacions és planteja la necessitat d'optimitzar el dimensionat fent servir algun algoritme per minimitzar el cost.

La funció a minimitzar és el cost  $f(x)$ :

$$f(x) = cost_{PV} \cdot x_1 + cost_{WT} \cdot x_2 + cost_{convbat} \cdot x_3 + cost_{bat} \cdot x_4 \quad (0)$$

Les restriccions:

El balanç de potència. La diferència entre la potència generada i la potència consumida per la càrrega equival a la suma de potència que regula el convertidor i la potència que es llença.

$$a(t)x_1 + b(t)x_2 - c(t)P_{peak} = P_{conv}(t) + P_{un}(t) \quad (1)$$

La restricció sobre el valor de la potència del convertidor, que en cap cas pot superar el valor màxim permès.

$$-x_3 \leq P_{conv}(t) \leq x_3 \quad (2)$$

Els límits de l'emmagatzematge d'energia. L'energia al finalitzar la iteració del temps  $t$  ha d'estar entre el mínim i màxim de la capacitat de la bateria.

$$E_{bat}(t) = E_{bat}(t-1) + incT \cdot P_{conv}(t) \quad (3)$$

$$k \cdot x_4 \leq E_{bat}(t) \leq x_4 \quad (4)$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, P_{un}(t), E_{bat}(t) \geq 0 \quad (5)$$

On  $a(t)$ ,  $b(t)$ ,  $c(t)$  és el rati de potència fotovoltaica, eòlica i la demanda respectivament. Les variables  $x_1, x_2, x_3, x_4$  són el valor de les quatre variables a dimensionar.  $P_{conv}(t)$  i  $P_{un}(t)$  la potència que el convertidor regula i la potència que no s'utilitza (i per tant es llença) en el temps  $t$ .  $E_{bat}(t)$  és l'energia que hi ha a la bateria en el temps  $t$ .

La constant  $k$  que es pren per determinar la capacitat mínima de bateria que pot cabre és 0,2. També són constants l'increment del temps,  $incT$ , i el pic de potència  $P_{peak}$ . Per comoditat, s'anomenarà d'ara en endavant la demanda total al temps  $t$   $C(t) = c(t)P_{peak}$ . Els valors de  $cost_{PV}$ ,  $cost_{WT}$ ,  $cost_{convbat}$ ,  $cost_{bat}$  són 1,3 €/W, 1,5 €/W, 0,3 €/W i 0,25 €/W



El criteri de signes es manté, essent valors positius per a entrades de potència al sistema bateria més convertidor i per sortides valors negatius.

## 7.2. Descripció del programa

El problema modelitzat és un problema de programació lineal, que es resoldrà mitjançant l'algoritme Símplex implementat a MATLAB. L'algoritme està basat en trobar un primer vèrtex factible i iterativament passar a un altre vèrtex factible adjacent i no pitjor fins que s'arriba a un vèrtex òptim [12].

Si es desitja optimitzar el model considerant dues hores es necessiten les quatre variables ja esmentades a l'apartat anterior,  $x_1, x_2, x_3, x_4$ , i tres més per cada hora: la potència que regula el convertidor  $x_5, x_6$ , l'energia emmagatzemada en el temps  $t$  que es guarda en les variables  $x_6, x_9$ , i la potència llençada  $x_7, x_{10}$ . Amb aquesta notació es poden reescriure les restriccions:

Per  $t = 1$

$$a(1)x_1 + b(1)x_2 - C(1) = x_5 + x_7 \quad (6)$$

$$-x_3 \leq x_5 \leq x_3 \quad (7)$$

$$x_6 = 0,6 \cdot x_4 + incT \cdot x_5 \quad (8)$$

$$0,2 \cdot x_4 \leq x_6 \leq x_4 \quad (9)$$

Per  $t = 2$

$$a(2)x_1 + b(2)x_2 - C(2) = x_8 + x_{10} \quad (10)$$

$$-x_3 \leq x_8 \leq x_3 \quad (11)$$

$$x_9 = x_6 + incT \cdot x_8 \quad (12)$$

$$0,2 \cdot x_4 \leq x_9 \leq x_4 \quad (13)$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_6, x_7, x_9, x_{10} \geq 0 \quad (14)$$

Cal fer notar que l'energia emmagatzemada inicialment està en funció de  $x_4$ . Del programa original de l'apartat de modelització es dedueix que equival a  $0,6 \cdot x_4$ , així que s'ha mantingut l'equivalència en el programa de l'Optimització.

A més, s'ha especificat que totes les variables, exceptuant les de la potència regulada pel convertidor,  $x_5$ ,  $x_8$ , són positives. S'ha substituït constant  $k$  pel seu valor.

$$\min f^T x \text{ tal que:} \quad (15)$$

$$A \cdot x \leq b \quad (16)$$

$$A_{eq} \cdot x = b_{eq} \quad (17)$$

$$lb \leq x \leq ub \quad (18)$$

La funció de MATLAB que s'ha emprat és *linprog* [13], que troba el mínim per un problema especificat de la següent manera:

On  $A$  i  $b$  són les matrius de les inequacions i  $A_{eq}$  i  $b_{eq}$  les d'equacions. Els límits inferiors i superiors queden determinats per  $lb$  i  $ub$ .

Per implementar les matrius a MATLAB s'han de reformular les restriccions.

$$a(1)x_1 + b(1)x_2 - x_5 - x_7 = C(1) \quad (19)$$

$$-x_3 - x_5 \leq 0 \quad (20)$$

$$-x_3 + x_5 \leq 0 \quad (21)$$

$$0,6 \cdot x_4 + x_5 - x_6 = 0 \quad (22)$$

$$0,2 \cdot x_4 - x_6 \leq 0 \quad (23)$$

$$-x_4 + x_6 \leq 0 \quad (24)$$

$$a(2)x_1 + b(2)x_2 - x_8 - x_{10} = C(2) \quad (25)$$

$$-x_3 - x_8 \leq 0 \quad (26)$$

$$-x_3 + x_8 \leq 0 \quad (27)$$

$$x_6 + x_8 - x_9 = 0 \quad (28)$$

$$0,2 \cdot x_4 - x_9 \leq 0 \quad (29)$$

$$x_4 + x_9 \leq 0 \quad (30)$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_6, x_7, x_9, x_{10} \geq 0 \quad (31)$$



Expressant-ho materialment a MATLAB, aquests són els límits inferiors, lb, i superiors, ub, de (31):

$$lb = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -Inf \ 0 \ 0 \ -Inf \ 0 \ 0) \quad ub = ()$$

Les matrius de les inequacions formades per (20), (21), (23), (24), (26), (27), (29), (30)

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$b = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$$

Les matrius de les equacions formades per (19), (22), (25), (28)

$$A_{eq} = \begin{pmatrix} a(1) & b(1) & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,6 & incT & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a(2) & b(2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & incT & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$b_{eq} = (C(1) \ 0 \ C(2) \ 0)$$

Per fer més entenedora l'explicació, només s'ha realitzat el raonament amb dues hores. Considerant tot un any, és a dir 8760 hores, calen  $4 + 3 \cdot 8760 = 26284$  variables.

Per determinar la grandària de matrius i vectors en primer lloc s'ha de saber el nombre de variables que està en funció del nombre d'hores i també el nombre d'equacions i inequacions que es tenen per cada hora. S'ha requadrat en blau les matrius que es necessitarien per una sola hora. Veient la posició dels valors que es van repetint i desplaçant es poden construir de manera iterativa les matrius en MATLAB.

### 7.3. Resultats

El punt òptim que determina MatrixLin03 és:

| Potència<br>fotovoltaica (kW) | Potència<br>eòlica (kW) | Potència màxima<br>convertidor (kW) | Energia màxima<br>bateria (kWh) |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| 17,51                         | 4,94                    | 7,78                                | 97,06                           |

Taula 2 Dimensionat de l'Optimització per un any

El cost del sistema seria de 56,78 k€ i una LCOE de 357,31€/MWh. Amb aquest valors, sobraria 18750,44 kW durant tot l'any.

Aquí es mostren unes gràfiques per visualitzar l'evolució d'algunes variables.

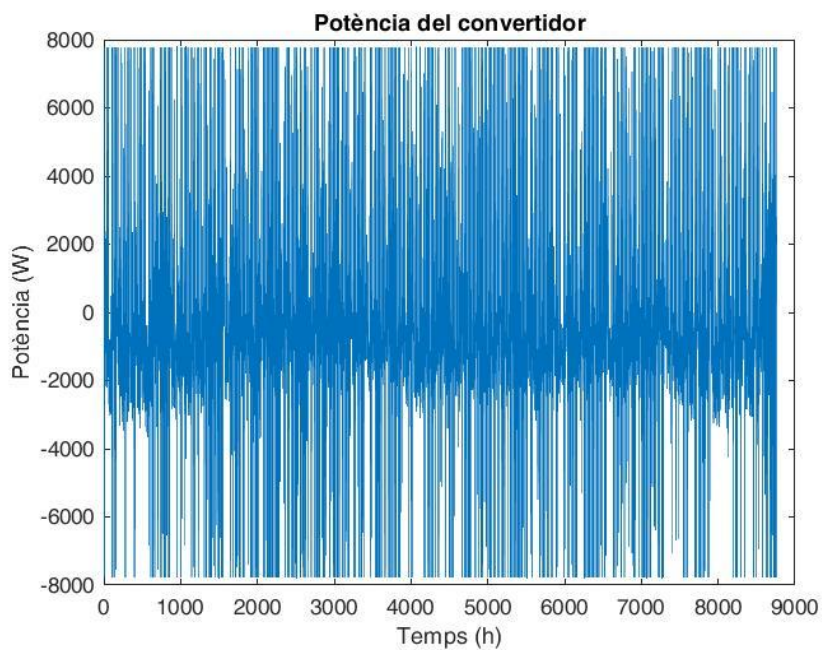


Figura 9 Potència del convertidor en un any

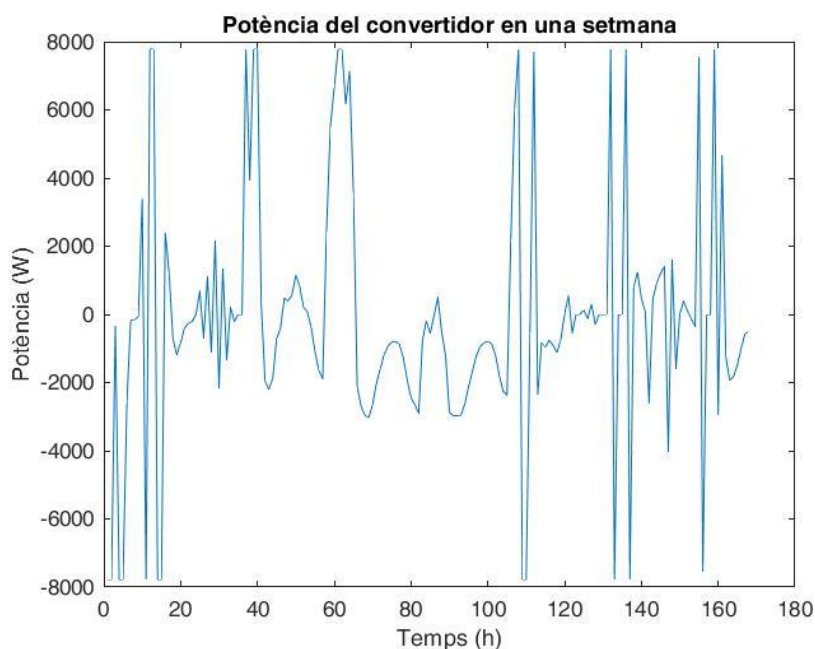
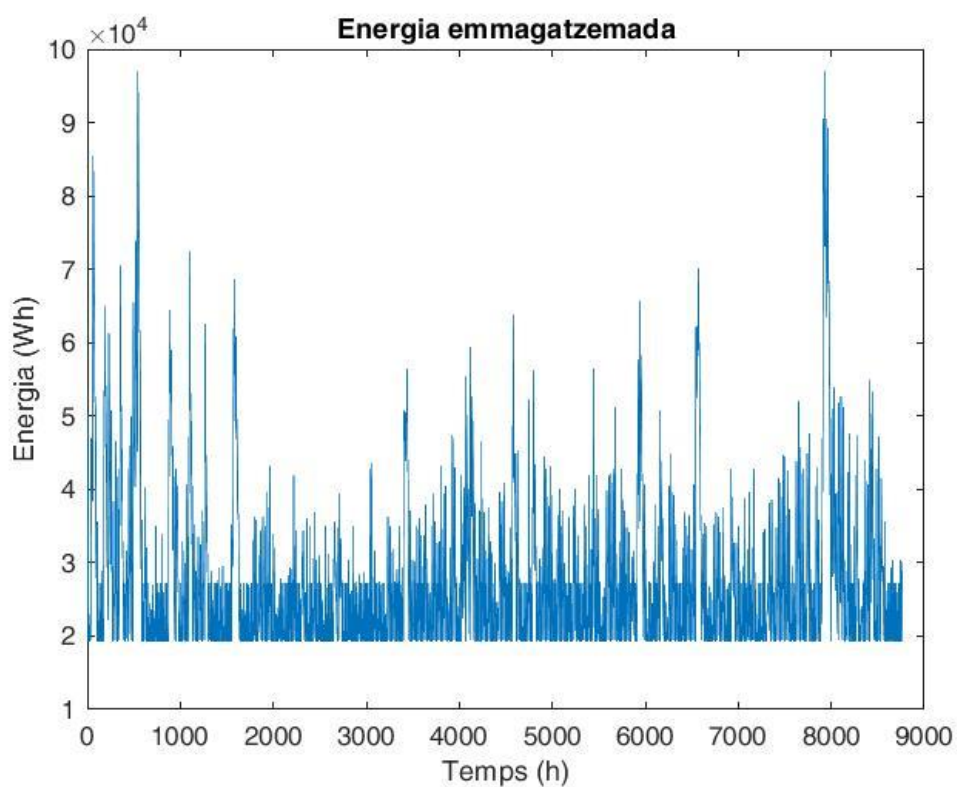
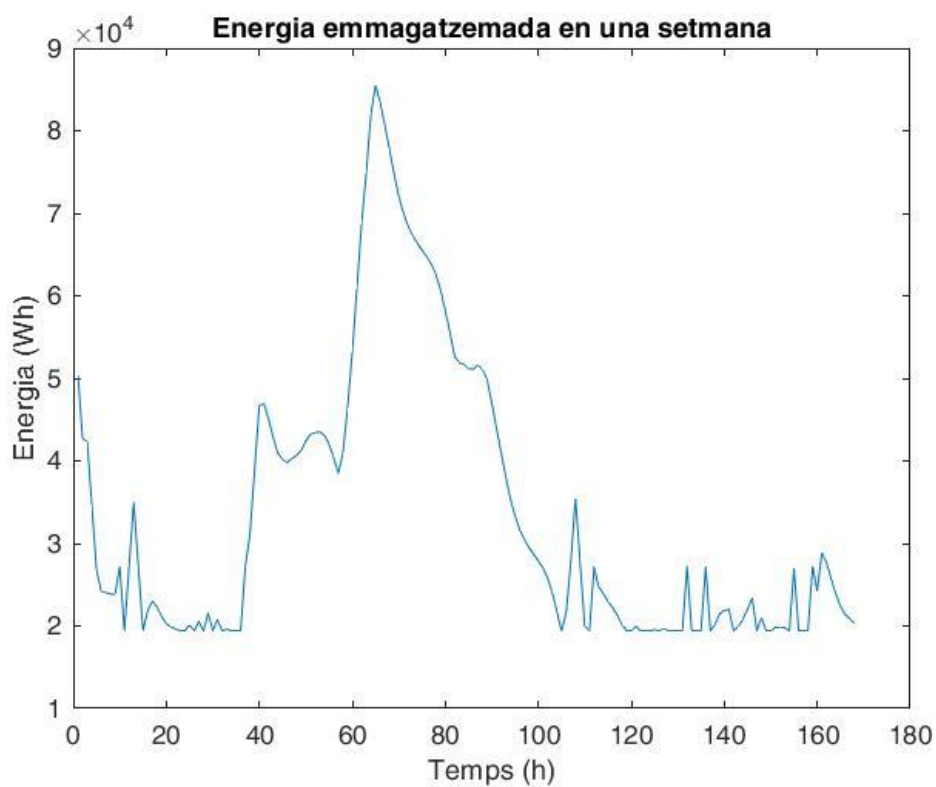


Figura 10 Potència del convertidor durant la primera setmana

*Figura 11 Energia de la bateria en un any**Figura 12 Energia de la bateria durant la primera setmana*

## 7.4. Comparativa entre la Modelització i l'Optimització

A la següent taula es comparen els resultats del dimensionat fent simulacions de l'apartat de Modelització i del dimensionat optimitzat mitjançant l'algoritme Símplex de l'Optimització.

|              | <b>PPV<br/>(kW)</b> | <b>PWT<br/>(kW)</b> | <b>Pconvmax<br/>(kW)</b> | <b>Ebatmax<br/>(kWh)</b> | <b>Cost<br/>(k€)</b> | <b>LCOE<br/>(€/MWh)</b> |
|--------------|---------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|
| Modelització | 30                  | 14                  | 5                        | 65                       | 77,75                | 489,28                  |
| Optimització | 17,51               | 4,94                | 7,78                     | 97,06                    | 56,78                | 357,31                  |

*Taula 3 Comparativa del dimensionat en un any*

Cal dir, que s'han comprovat els resultat obtinguts a MatixLin03 en el programa original taskassignment2b02 amb què s'han fet les simulacions de la Modelització per corroborar que el cost i el LCOE era igual, i així ha sigut.

La gran diferència dels valors es deu a la gestió de l'emmagatzematge de la bateria. Comparant les Figures 5 i 11 de l'apartat de Modelització i Optimització respectivament es veu com en un cas es té la bateria casi sempre plena, mentre en el segon cas el SoC de la bateria està vora el llindar inferior. Vist en detall, les Figures 5 i 6 mostren com en el cas de Modelització i ha una davallada del SoC mentre que a l'Optimització hi ha un pic hores abans de la davallada. Tot això, amb les corresponents entrades i sortides de potència del convertidor.

A més, hi ha tres casos que criden l'atenció. En segons quines hores:

1. Es llença més potència de la qual s'ha generat.
2. S'extreu potència alhora que se'n llença.
3. S'extreu potència encara que es generi més potència de la que es necessita.

De fet, no són casos independents. Tant els casos en què ocorre 1 com 3 estan englobats a 2. Això és perquè part de la potència que es llença, prové de la potència extreta de la bateria.

Es podria dir que MATLAB assoleix un òptim econòmic, tot i que en termes d'eficiència sigui un contrasentit. Els següents apartats pretenen millorar la simulació per tal de fer-la més semblant a la realitat.

## 8. Millora de l'Optimització

### 8.1. Descripció matemàtica del model

La versió millorada inclou com a restricció la impossibilitat de llençar més potència de la qual es genera (34), i a més, s'inclou a la funció objectiu el sumatori de tota la potència que no s'utilitza per minimitzar-la (33). Aquest terme, ha de ser prou petit com per no alterar el resultat del dimensionat.

Tot i tenir un model més semblant a la realitat, al augmentar les dimensions de les matrius, MATLAB no té suficient memòria disponible per fer la simulació d'un any sencer. Per això només es realitzarà en mig any. A l'Annex B s'expliquen les millores de cada versió que s'han desenvolupat fins arribar a aquest model juntament amb el codi de les versions que es presenten els apartats d'Optimització.

$$f(x) = cost_{PV} \cdot x_1 + cost_{WT} \cdot x_2 + cost_{convbat} \cdot x_3 + cost_{bat} \cdot x_4 + 10^{-6} \sum_{t=1}^{hours} Pun(t) \quad (32)$$

$$a(t)x_1 + b(t)x_2 - C(t) = Pconv(t) + Pun(t) \quad (33)$$

$$a(t)x_1 + b(t)x_2 \geq Pun(t) \quad (34)$$

$$-x_3 \leq Pconv(t) \leq x_3 \quad (35)$$

$$Ebat(t) = Ebat(t-1) + incT \cdot Pconv(t) \quad (36)$$

$$0,2 \cdot x_4 \leq Ebat(t) \leq x_4 \quad (37)$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, Pun(t), Ebat(t) \geq 0 \quad (38)$$

### 8.2. Resultats

El punt òptim que determina MatrixLin07 és:

| Potència<br>fotovoltaica (kW) | Potència<br>eòlica (kW) | Potència màxima<br>convertidor (kW) | Energia màxima<br>bateria (kWh) |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| 12,26                         | 4,44                    | 6,69                                | 104,58                          |

Taula 4 Dimensionat de l'Optimització millorat per mig any

El cost del sistema seria de 50,75 k€ i una LCOE de 324,40 €/MWh. Amb aquest valors, sobraria 5411,61 kW durant tot l'any.

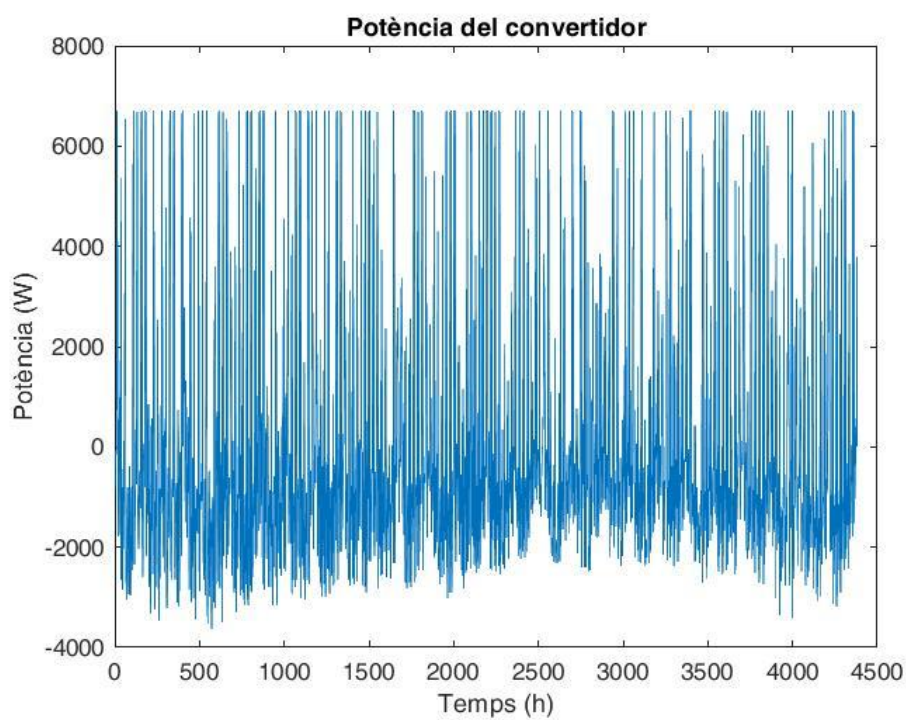


Figura 13 Potència del convertidor en mig any

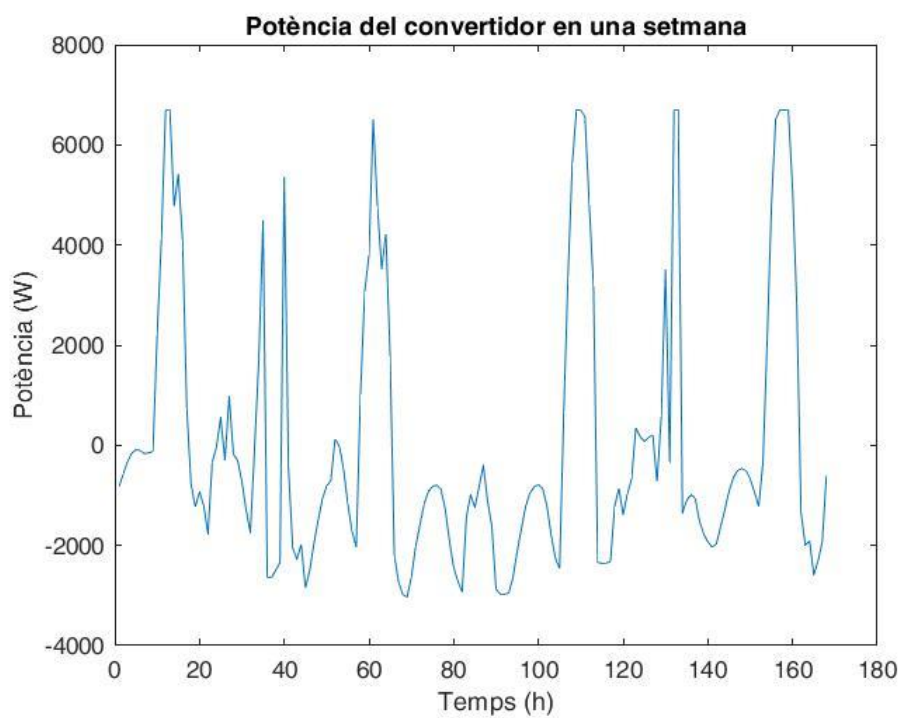
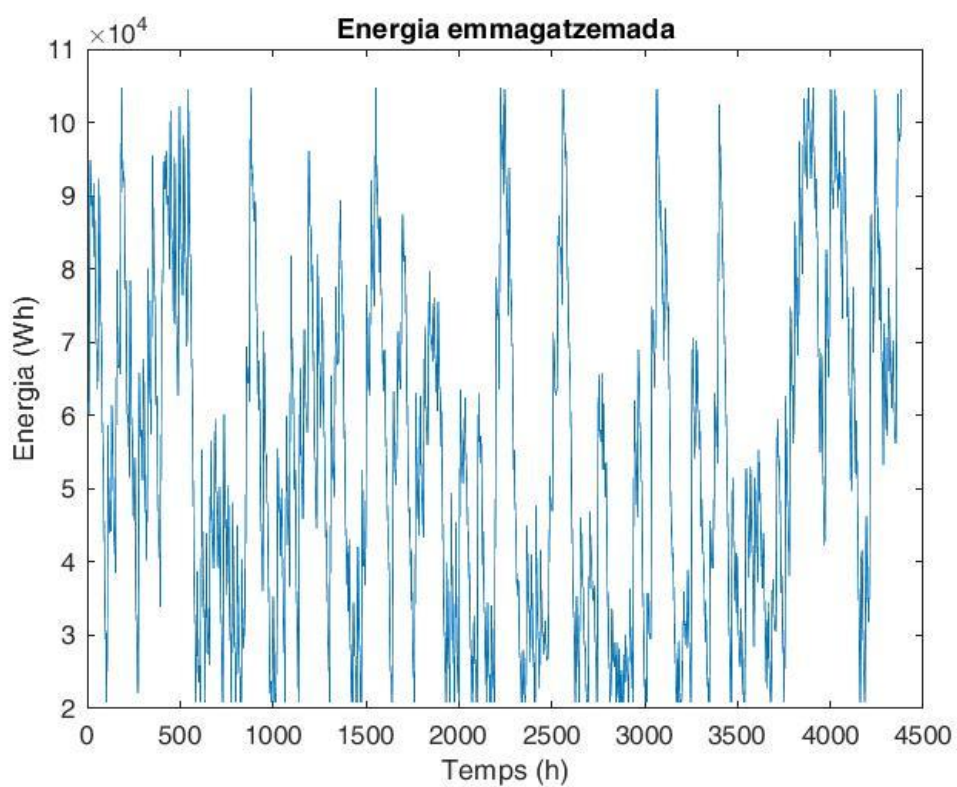
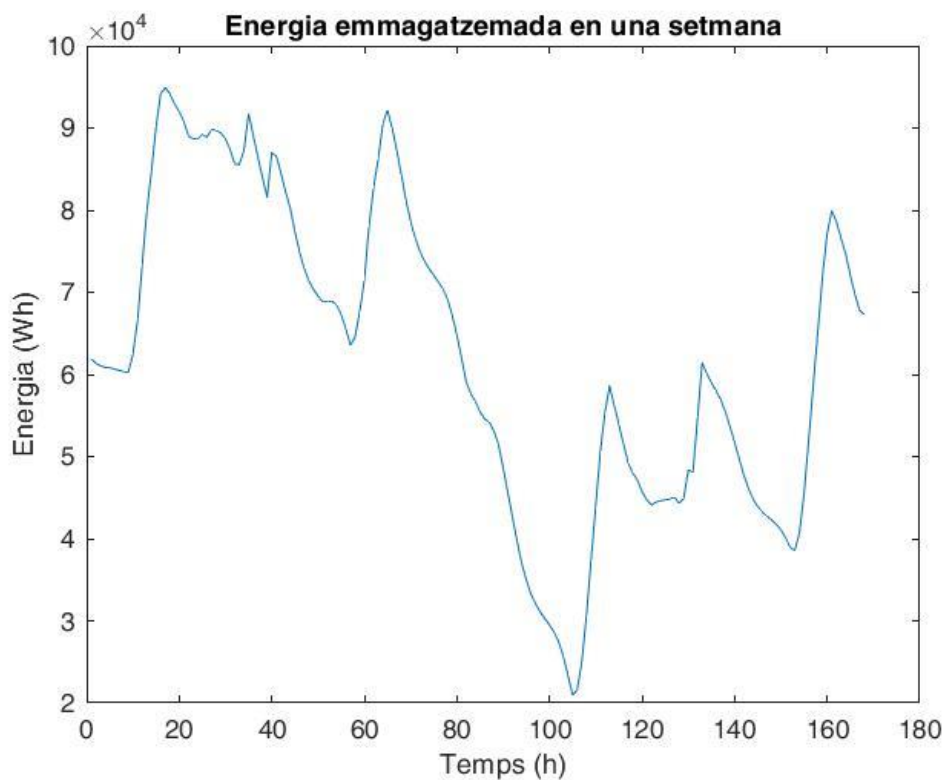


Figura 14 Potència del convertidor durant la primera setmana



*Figura 15 Energia de la bateria en mig any**Figura 16 Energia de la bateria durant una setmana*

### 8.3. Comparativa entre versions de l'Optimització

|             | PPV<br>(kW) | PWT<br>(kW) | Pconvmax<br>(kW) | Ebatmax<br>(kWh) | Pun<br>(kW) | Cost<br>(k€) | LCOE<br>(€/MWh) |
|-------------|-------------|-------------|------------------|------------------|-------------|--------------|-----------------|
| MatrixLin03 | 12,26       | 4,44        | 6,69             | 104,58           | 5483,17     | 50,75        | 324,40          |
| MatrixLin07 | 12,26       | 4,44        | 6,69             | 104,58           | 5411,62     | 50,75        | 324,40          |

Taula 5 Comparativa del dimensionat per dues versions d'Optimització en mig any

Els resultats numèrics per les quatre variables del dimensionat són els mateixos per les versions MatrixLin03 i MatrixLin07. Sí que es notòria la disminució de la potència llençada. Aquest fet queda reflectit en els Figures 15 i 16 en què el SoC de la bateria és més semblant a la realitat.

L'impediment de llençar més potència de la que es genera té el seu efecte. Es passa de 301 casos a 153, que de fet, els 153 queden per sota una tolerància de  $10^{-10}$  i per tant, es pot considerar que sí compleix la restricció. No obstant, les hores en què es llença potència de la que s'ha extret de la bateria augmenta de 558 a 1238 casos.



## 9. Cas amb rendiment del convertidor

### 9.1. Descripció matemàtica del model

Per tal de disminuir els casos en què s'extreu potència de la bateria i es llença part d'aquesta es pot considerar que el convertidor té un rendiment  $\eta$ . De manera que ara es distingeix la potència que entra/surt de la bateria de la qual entra/surt del convertidor. Amb la funció objectiu (32), les restriccions són:

$$a(t)x_1 + b(t)x_2 - C(t) = P_{conv}(t) + P_{un}(t) \quad (39)$$

$$a(t)x_1 + b(t)x_2 \geq P_{un}(t) \quad (40)$$

$$-x_3 \leq P_{conv}(t) \leq x_3 \quad (41)$$

$$P_{bat} = \begin{cases} \eta P_{conv}(t) & \text{si } P_{conv} \geq 0 \\ \frac{1}{\eta} P_{conv}(t) & \text{si } P_{conv} \leq 0 \end{cases} \quad (42)$$

$$E_{bat}(t) = E_{bat}(t-1) + incT \cdot P_{bat}(t) \quad (43)$$

$$0,2 \cdot x_4 \leq E_{bat}(t) \leq x_4 \quad (44)$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, P_{un}(t), E(t) \geq 0 \quad (45)$$

La funció del *linprog* no permet implementar una funció a trossos que depengui d'una variable. Per aquest motiu, cal fer servir dues variables per la potència del convertidor. Una per valors positius, és a dir, d'entrada de potència a la bateria, i una altra negativa pel cas contrari. S'anomenaran  $P_{convp}(t)$  i  $P_{convn}(t)$  respectivament

$$a(t)x_1 + b(t)x_2 - C(t) = P_{convp}(t) + P_{convn}(t) + P_{un}(t) \quad (46)$$

$$a(t)x_1 + b(t)x_2 \geq P_{un}(t) \quad (47)$$

$$0 \leq P_{convp}(t) \leq x_3 \quad (48)$$

$$-x_3 \leq P_{convn}(t) \leq 0 \quad (49)$$

$$E_{bat}(t) = E_{bat}(t-1) + \eta \cdot incT \cdot P_{convp}(t) + \frac{1}{\eta} \cdot incT \cdot P_{convn}(t) \quad (50)$$

$$0,2 \cdot x_4 \leq E_{bat}(t) \leq x_4 \quad (51)$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, P_{convp}(t), E(t), P_{un}(t) \geq 0 \quad P_{convn}(t) \leq 0 \quad (52)$$

## 9.2. Resultats per diferents rendiments

A continuació es mostren els resultats de MatrixLin71 per diferents valors de rendiment per mig any.

|                  | PPV<br>(kW) | PWT<br>(kW) | Pconvmax<br>(kW) | Ebatmax<br>(kWh) | Pun<br>(kW) | Cost<br>(k€) | LCOE<br>(€/MWh) |
|------------------|-------------|-------------|------------------|------------------|-------------|--------------|-----------------|
| $\eta = 100\%$   | 12,26       | 4,44        | 6,69             | 104,58           | 5411,62     | 50,75        | 324,40          |
| $\eta = 99,99\%$ | 12,26       | 4,44        | 6,69             | 104,59           | 5496,05     | 50,75        | 324,42          |
| $\eta = 95\%$    | 12,69       | 4,76        | 7,10             | 108,67           | 4302,59     | 52,94        | 338,41          |
| $\eta = 90\%$    | 13,51       | 4,83        | 7,83             | 113,28           | 2175,26     | 55,476       | 354,62          |
| $\eta = 85\%$    | 14,51       | 4,92        | 8,51             | 118,09           | 1132,41     | 58,31        | 372,72          |
| $\eta = 80\%$    | 15,70       | 4,97        | 9,42             | 123,68           | 864,15      | 61,62        | 393,88          |

Taula 6 Comparativa del dimensionat per diferents rendiments en mig any

A les pàgines següents hi ha un exemple de l'evolució de la potència que regula el convertidor i l'energia que emmagatzema la bateria per un rendiment del 90%. Comparant les Figures amb les del cas millorat no es veu una diferència massa significativa. On realment es notori el canvi, és en la potència que no s'utilitza, que disminueix de manera considerable. Tant en quantitat total, com es pot veure a la Taula 6, com en casos. Per veure l'evolució de la disminució de la potència llençada es poden consultar les Figures 21, 22 i 23. La potència que s'extreu de la bateria i es llença també disminueix. En concret es passa de 1238 per un  $\eta = 100\%$  a 129 i 3 (per sota de la tolerància) casos per  $\eta = 90\%$  i  $\eta = 80\%$  respectivament.

Mentre que la potència no utilitzada disminueix, les quatre variables a dimensionar augmenten. Per ampliar la informació es pot consultar l'Annex C on es mostra l'evolució de les variables per  $\eta = 80\%$

Aquest model presenta un inconvenient, mentre que el balanç de potència es compleix perfectament, l'estat de la bateria no correspon exactament a la realitat, ja que hi ha ocasions que MATLAB interpreta que s'extreu i s'introdueix energia a la bateria en el mateix increment de temps. Això es deu a la formulació de l'equació (50). És d'imaginar que el dimensionat no canviaria en excés, ja que per  $\eta = 100\%$  s'ha utilitzat el programa original MatrixLin07 i coincideix. El que sí canviaria és l'estat de la bateria intermedi.

Com a alternativa s'ha realitzat el mateix estudi a partir de la versió MatrixLin03. Es pot consultar a l'Annex D.

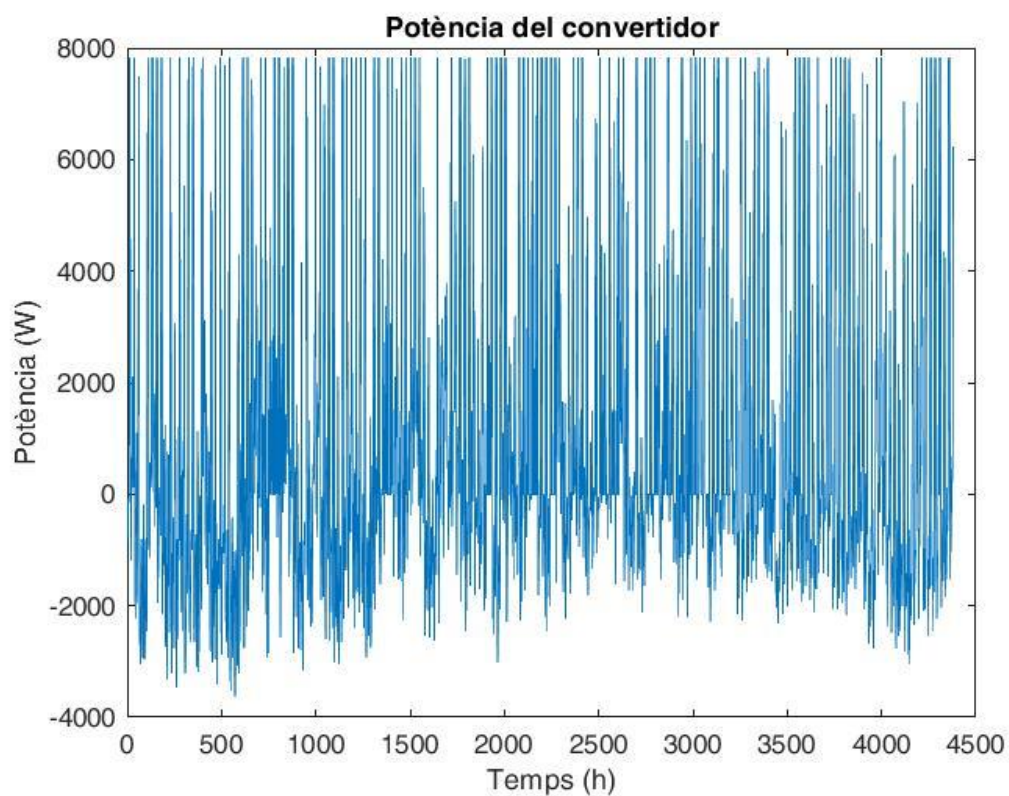


Figura 17 Potència del convertidor en mig any per un rendiment del 90 %

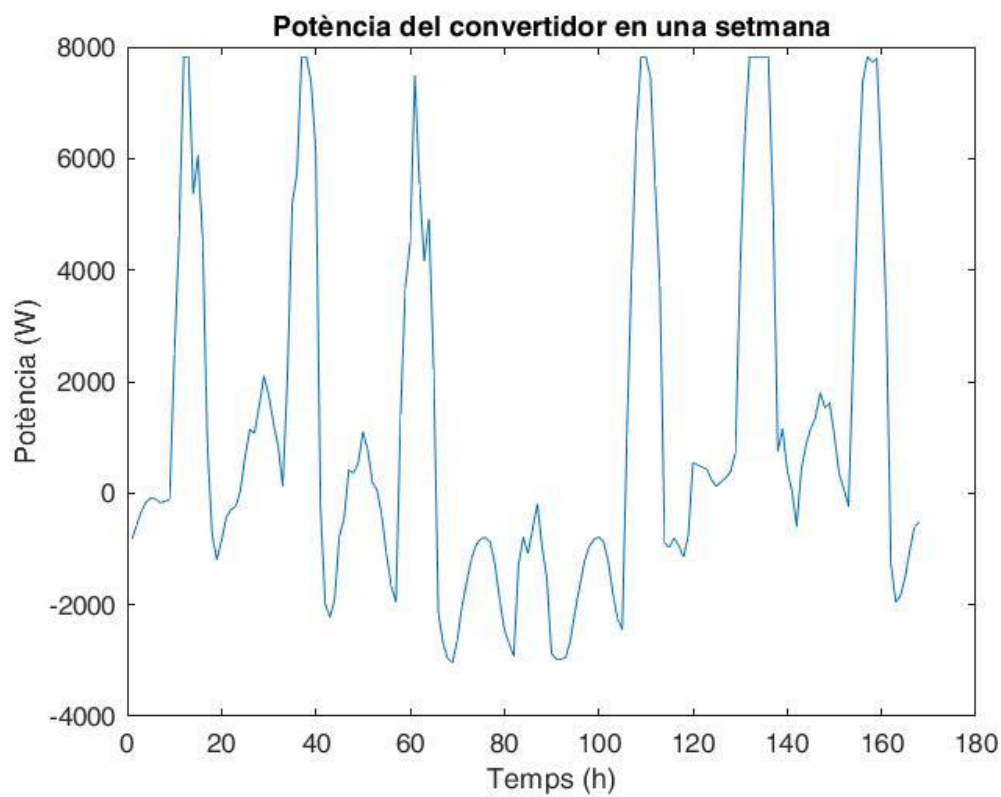


Figura 18 Potència del convertidor durant la primera setmana per un rendiment del 90 %

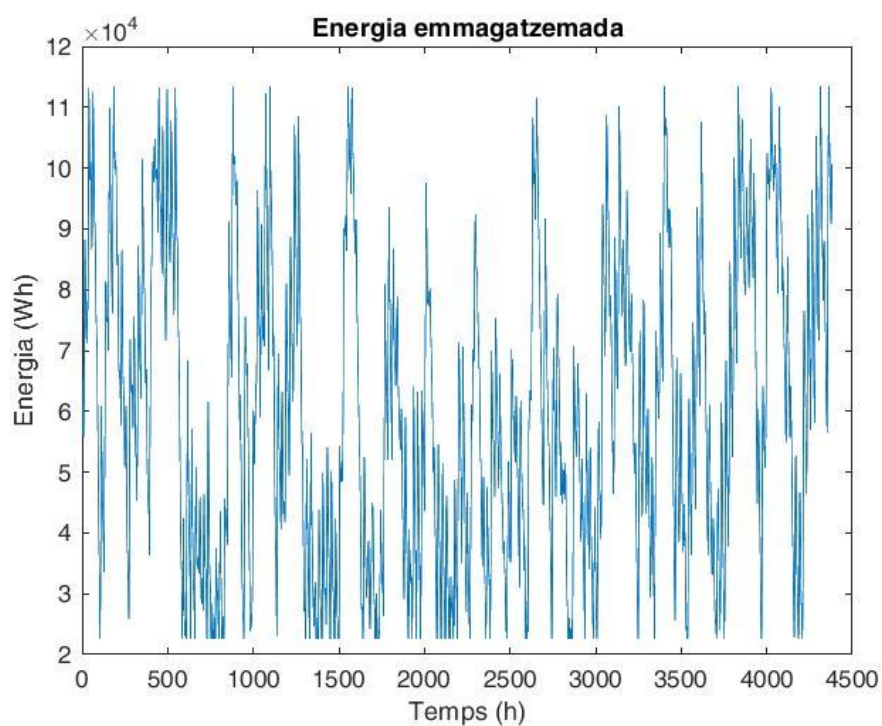


Figura 19 Energia de la bateria en mig any per un rendiment del 90 %

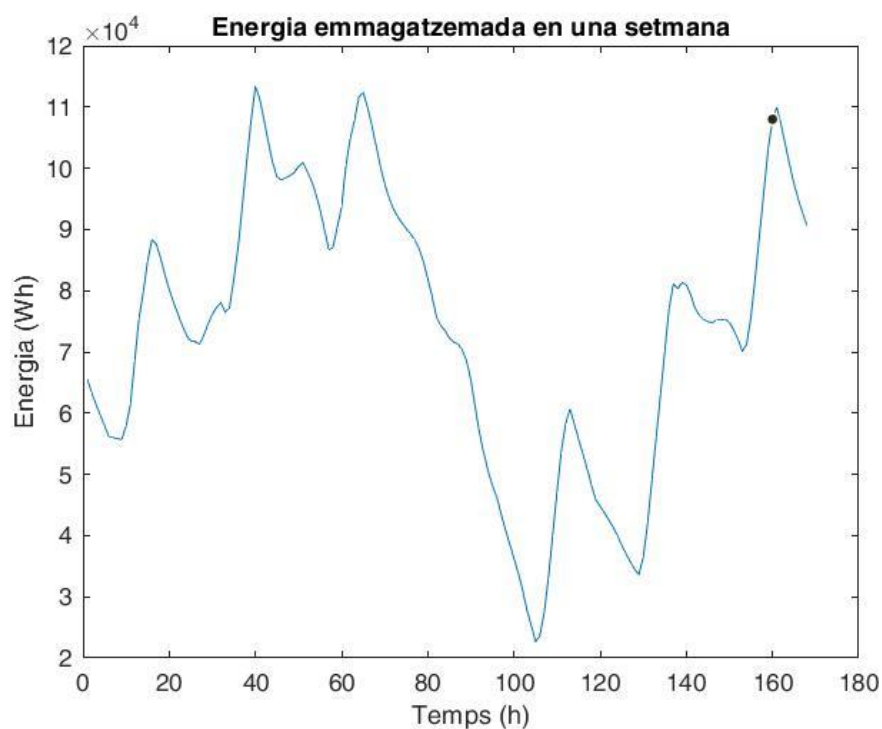


Figura 20 Energia de la bateria durant la primera setmana per un rendiment del 90 %

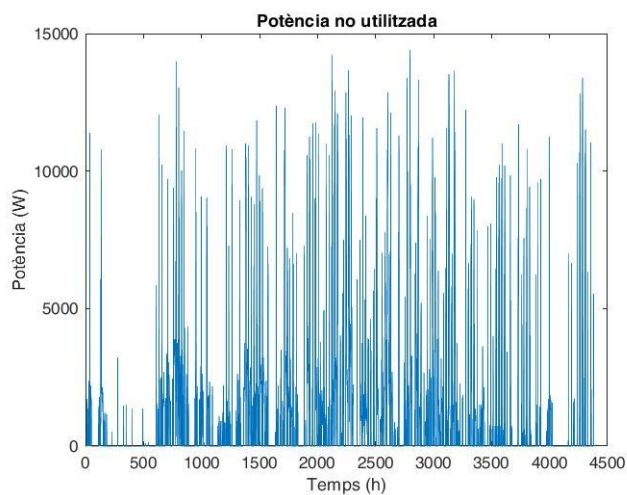


Figura 21 Potència no utilitzada en mig any per un rendiment del 99,99 %

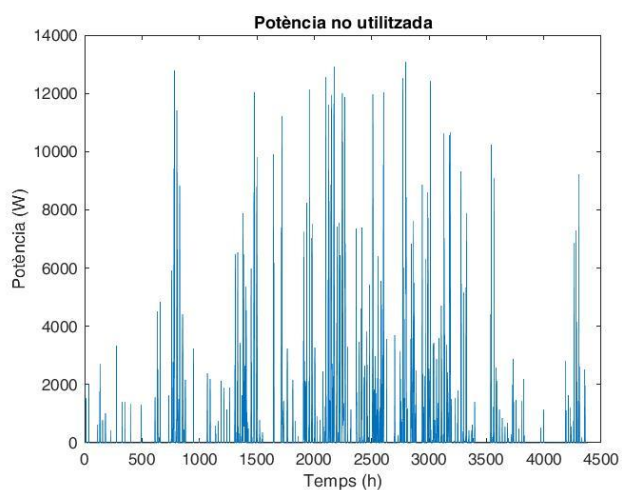


Figura 22 Potència no utilitzada en mig any per un rendiment del 90 %

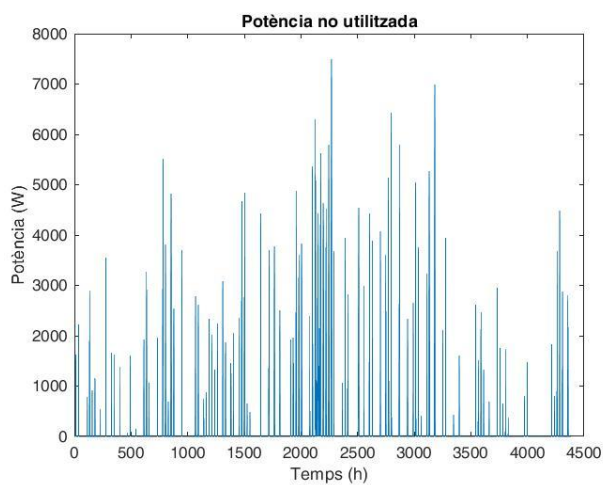


Figura 23 Potència no utilitzada en mig any per un rendiment del 80 %

### 9.3. Comparativa econòmica

En comptes d'una microxarxa es pot proporcionar la potència necessària de maneres alternatives, per exemple directament des de la xarxa elèctrica o bé amb un generador dièsel. En total, en mig any s'ha consumit 7822 kW

Des de la xarxa es pot imputar un cost de 1,10667 €/kWh, desglossat en els següents costos:

- Consum [14]
- Instal·lació i manteniment
- Potència contractada
- TOTAL 8,34 k€

Per un generador dièsel:

- Cost del generador [15] 2019 €
- Preu consum del dièsel en mig any [16] 1325,8 €
- Instal·lació i manteniment 4500 €
- TOTAL 7,84 k€

Si per instal·lar una microxarxa amb un convertidor de rendiment  $\eta = 80\%$  costa 61,62 k€, el preu per ambdues alternatives a la microxarxa queden molt per sota.

## Conclusions

El programa desenvolupat en l'apartat de Modelització és útil per veure com varia la potència que sobra, la que no es satisfà, el cost i el LCOE en funció del dimensionat de partida.

El programa optimitzat calcula el dimensionat amb l'objectiu de minimitzar el cost, això fa que porti a alguns contrasentits amb la realitat que cal especificar a MATLAB perquè no ocorrin. S'observa que MATLAB tendeix a llençar la potència que no es necessita de la bateria en comptes d'emmagatzemar-la.

Per millorar el model, s'ha afegit la impossibilitat de llençar més potència de la que es genera i l'addició d'un terme a la funció principal per minimitzar la potència no utilitzada. Aquest segon fet té un efecte directe en la gestió de l'energia de la bateria. El SoC ja no es manté constantment vora el llindar inferior. De tota manera, el dimensionat i per tant el cost no varia.

La penalització de l'entrada/sortida de potència del convertidor associant un rendiment no ideal redueix els casos en què es llença potència de la qual s'extreu de la bateria, fent el model més similar a la realitat.

La gestió de l'energia de la bateria difereix entre la modelització amb operands lògics i el model matemàtic amb equacions. Mentre el primer emmagatzema tota l'energia que hi cap a la bateria, el segon dimensiona la microxarxa amb els valors límit que prenen les variables de potència i energia. Val a dir, que MATLAB té la informació de tot l'any, mentre que en un escenari real es té un grau d'incertesa que porta a prioritzar l'emmagatzematge d'energia.

Per què la microxarxa sigui una manera de generar i distribuir electricitat econòmicament rendible, cal que els preus siguin més competitius del que ho són en aquest moment.

Algunes línies de futur d'aquest treball podrien ser incloure l'autodescàrrega de la bateria i les pèrdues dels elements d'electrònica de potència d'ambdues fonts d'energia.



# Bibliografia

## Referències bibliogràfiques

- [1] EUROPEAN UNION, *EU energy in figures. Statistical Pocketbook 2018*. Luxemburg. Publicacions de la oficina de la Unió Europea, 2018, pp. 10
- [2] *Renewable energy* [en línia] Comissió Europea. [Consulta: 4 d'abril de 2019]  
<https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy>
- [3] Microgrids at Berkeley Lab [en línia] Grid Integration group, Energy storage and distributed resources division. [Consulta: 12 de febrer de 2019]  
<https://building-microgrid.lbl.gov/about-microgrids>
- [4] Microgrid Resources Coalition [en línia] International district energy association. [Consulta: 12 de febrer de 2019]  
<https://www.districtenergy.org/microgrids/about-microgrids97/features>
- [5] SBC Energy Institute Wind Power [en línia] Factbook series Leading the energy transition, 2013, p. 2, 3 [Consulta: 27 de febrer de 2019]  
[https://energypedia.info/images/3/38/Wind\\_Power\\_FactBook.pdf](https://energypedia.info/images/3/38/Wind_Power_FactBook.pdf)
- [6] Jamil, M. et al. *Microgrid Power Electronic Converters: State of Art and Future Challenges*, IEEE Xplore 2009
- [7] Tudela, M. et al. *Energia solar fotovoltaica* Barcelona Generalitat de Catalunya, Institut Català d'Energia, 2011 pp 45-63
- [8] Villarrubia, M. *Ingeniería de la Energía Eólica* Ed. Marcombo S.A., 2011 pp. 131,149-162
- [9] Gomis O. et al. *Active and Reactive Power Control of Grid Connected Distributed Generation a Modelling and Control of Sustainable Power Systems* System Springer-Verlag, 2011 pp 47-49
- [10] Díaz-González, F. et al. *Energy Storage in Power Systems* Ed. John Wiley & Sons, 2016 pp 93-141
- [11] Eurobat. Association of European Automotive and Industrial Battery Manufacturers [en línia] Battery technologies [Consulta: 7 d'abril de 2019]  
<https://eurobat.org/batteries-contribution/battery-technologies/sodium-based>
- [12] Programació Lineal. Transparències de l'assignatura d'Optimització i Simulació. Departament d'Organització d'empreses, ETSEIB. Diapositiva 16. Quadrimestre de Primavera Curs 2017-2018
- [13] Matlab Documentation. Linprog.[en línia] [Consulta: 24 d'abril de 2019]  
<https://uk.mathworks.com/help/optim/ug/linprog.html?requestedDomain=>
- [14] Tarifa luz hora [en línia] [Consulta: 14 de juny de 2019]  
<https://tarifaluzhora.es/>
- [15] Venta de generadores [en línia] [Consulta: 14 de juny de 2019]  
<https://www.ventageneradores.net/comprar-generador-electrico/generador-electrico-trifasico-diesel-6000w>
- [16] Expansión. Datosmacro.com [en línia] [Consulta: 14 de juny de 2019]  
<https://datosmacro.expansion.com/energia/precios-gasolina-diesel-calefaccion/espana>



## Bibliografia complementària

Hasimah Abdul Rahman et al. *Use of photovoltaics in microgrid as energy* International Journal of Electrical and Computer Engineering. Abril 2016.

Proposa un disseny d'una microxarxa en MATLAB integrant fonts d'energia descentralitzades i un control automatitzat.

Porsinger, Tobias et al. *Modelling and OPTimization in Microgrids*. Energies. Abril 2017

Resulta interessant perquè fa l'explicació de com s'interrelacionen els diferents elements de la microxarxa amb l'exemple concret dels vehicles elèctrics com a càrrega.

Exemple MATLAB *linprog*. [en línia] [Consulta: 22 d'abril de 2019]

<https://www.mathworks.com/videos/mathematical-modeling-with-optimization-part-2-68974.html>

Explicació dual-simplex MATLAB [en línia] [Consulta: 24 d'abril de 2019]

<https://uk.mathworks.com/help/optim/ug/linear-programming-algorithms.html#budwan6>

## 10. Annex A

% The aim of this program is to study how curtailed generation and non-supplied power are affected if the PVinstalled, WTinstalled, Pconvmax and Ebatmax are modified

```
% Loading the data and setting parameters
load dat1.mat
% Col 1 - Actual PV power/PV power installed
% Col 2 - Actual Wind power/wind power installed
% Col 3 - Actual load/Peak load power
hours = 8760;

incT = 1; % 1 hour time increments
Ppeak = 4000; % Peakdemand
cost_PV = 1.3; % eur/w cost panel + inverter
cost_WT = 1.5; % eur/w cost wind
cost_convbat = 0.3; % eur/w cost battery converter
cost_bat = 0.25; % euros/wh cost battery

% Define variables to be optimized
%[PVinstalled WTinstalled BATconverter BATenergy]
x(1)= 30000; % PVinstalled
x(2)= 14000; % WTinstalled
x(3)= 5000; % Pconvmax
x(4)= 65000; % Ebatmax

% Analysing one year of data
Ebatmax=x(4);
Ebatmin=x(4)*0.2; % 20% max discharge
Pbatmax=x(3);

genPV= dat1([1:hours],1)*x(1); % W PV available
genWT= dat1([1:hours],2)*x(2); % W wind available
totalgen = genPV + genWT; % total generation
dload = dat1([1:hours],3)*Ppeak; % W demand
tmax = length(dload)*incT;

Eini = Ebatmin + (Ebatmax-Ebatmin)*0.5; %initial energy in the
battery
Ebat(1) = Eini;

for ii = 1:1:length(genPV)
    difference = totalgen(ii) - dload(ii);

    if ii == 1
        % If it is generated more than needed
        if difference >= 0
            % If energy can be saved, store it in the battery
            if Eini + difference*incT <= Ebatmax
                Pconv(ii) = difference;
            else
```

```

        Pconv(ii) = (Ebatmax - Eini)*incT;
    end
    % Accomplish the converter restriccion
    if Pconv(ii) > Pbatmax
        Pconv(ii) = Pbatmax;
        r = r + 1;
    end
    % If it is needed more than generated
    else
        % Energy can be drawn from the battery until the low
limit is
        % reached
        if Eini + difference*incT >= Ebatmin
            Pconv(ii) = difference;
        else
            Pconv(ii) = -(Eini-Ebatmin)*incT;
        end
        % Accomplish the converter restriccion
        if Pconv(ii) < -Pbatmax
            Pconv(ii) = -Pbatmax;
            r = r + 1;
        end
    end
    end
    % Battery Balance
    Ebat(ii) = Eini + Pconv(ii)*incT;

else

    if difference >= 0
        if Ebat(ii-1) + difference*incT <= Ebatmax
            Pconv(ii) = difference;
        else
            Pconv(ii) = (Ebatmax - Ebat(ii-1))*incT;
        end
        if Pconv(ii) > Pbatmax
            Pconv(ii) = Pbatmax;
        end
    else
        if Ebat(ii-1) + difference*incT >= Ebatmin
            Pconv(ii) = difference;
        else
            Pconv(ii) = -(Ebat(ii-1)-Ebatmin)*incT;
        end
        if Pconv(ii) < -Pbatmax
            Pconv(ii) = -Pbatmax;
        end
    end
    end
    Ebat(ii) = Ebat(ii-1) + Pconv(ii)*incT;

end

end

```

```

% Analyzing and showing results
% [PVinstalled WTinstalled BATconverter BATenergy]
cost = x(1)*cost_PV+ x(2) * cost_WT+ x(3) * cost_convbat+ x(4) *
cost_bat;

Enetot=sum(dload);
lifetime=10; %years
lcoe= cost/(1e-6*lifetime*(8760/length(Ebat))*Enetot); % eur/MWh
lifetime

% Deviation between available generation and load, positive-
>curtailment, negative->load
% non supplied
Ptotal= (genPV + genWT - Pconv' -dload);
etotcg= sum(max(0,Ptotal)); %Total curtailed generation
etotns= sum(max(0,-Ptotal)); %Total demand non-supplied

display(['Ppeak = ' num2str(Ppeak*1e-3) ' kW'])
display(['PPV = ' num2str(x(1)*1e-3) ' kW'])
display(['PWT = ' num2str(x(2)*1e-3) ' kW'])
display(['Pbatmax = ' num2str(x(3)*1e-3) ' kW'])
display(['Ebatmax = ' num2str(x(4)*1e-3) ' kWh'])
display(['Curtailed generation = ' num2str(etotcg*1e-3) ' kW'])
display(['Non supplied demand = ' num2str(etotns*1e-3) ' kW'])
display(['Cost = ' num2str(cost*1e-3) ' k€'])
display(['LCOE = ' num2str(lcoe) ' €/MWh'])

```

| PPV<br>(kW) | PWT<br>(kW) | Pconvmax<br>(kW) | Ebatmax<br>(kWh) | Curtailed<br>(kW) | Non supplied<br>(kW) | Cost<br>(k€) | LCOE<br>(€/MWh) |
|-------------|-------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|--------------|-----------------|
| 100         | 100         | 100              | 100              | 285001,43         | 0                    | 335          | 2108,703        |
| <b>30</b>   | <b>14</b>   | <b>5</b>         | <b>65</b>        | <b>51336,67</b>   | <b>0</b>             | <b>77,75</b> | <b>489,28</b>   |

Taula 7 Simulacions programa taskassignment2b02

| PPV (kW) | PWT (kW) | Pconvmax (kW) | Ebatmax (kWh) | Curtailed (kW) | Non supplied (kW) | Cost (k€) | LCOE (€/MWh) |
|----------|----------|---------------|---------------|----------------|-------------------|-----------|--------------|
| 3        | 3        | 3             | 3             | 955,44         | 7819,2399         | 10,05     | 63,2451      |
| 30       | 30       | 30            | 30            | 74448,01       | 70,9761           | 100,5     | 632,4511     |
| 300      | 300      | 300           | 300           | 886786,23      | 0,83273           | 1005      | 6324,5109    |
| 3000     | 3000     | 3000          | 3000          | 9010869,9      | 0,83273           | 10050     | 63245,1087   |
| 350      | 350      | 350           | 350           | 1037232,2      | 0,83273           | 1172,5    | 7378,596     |
| 200      | 200      | 200           | 200           | 585894,24      | 0,83273           | 670       | 4216,3406    |
| 150      | 150      | 150           | 150           | 435448,26      | 0,83273           | 502,5     | 3162,2554    |
| 100      | 100      | 100           | 100           | 285002,26      | 0,83273           | 335       | 2108,1703    |
| 80       | 80       | 80            | 80            | 224823,86      | 0,83273           | 268       | 1686,5362    |
| 50       | 50       | 50            | 50            | 134556,27      | 0,83273           | 167,5     | 1054,0851    |
| 40       | 40       | 40            | 40            | 104473,21      | 6,9769            | 134       | 843,2681     |
| 50       | 50       | 40            | 40            | 134560,27      | 0,83273           | 162       | 1019,4734    |
| 50       | 50       | 30            | 30            | 134588,30      | 24,8605           | 156,5     | 984,8616     |
| 50       | 50       | 20            | 40            | 134560,27      | 0,83273           | 156       | 981,7151     |
| 50       | 50       | 10            | 40            | 134560,27      | 0,83273           | 153       | 962,836      |
| 55       | 40       | 10            | 40            | 128019,65      | 0,83273           | 144,5     | 909,3451     |
| 50       | 40       | 10            | 40            | 120168,79      | 0,83273           | 138       | 868,44       |
| 48       | 40       | 10            | 40            | 117028,49      | 0,87626           | 135,4     | 852,0784     |
| 40       | 40       | 50            | 50            | 104463,07      | 0,83273           | 139,5     | 877,8799     |
| 40       | 30       | 50            | 50            | 90071,59       | 0,83273           | 124,5     | 783,4842     |
| 40       | 25       | 50            | 50            | 82875,85       | 0,83273           | 117       | 736,2863     |
| 40       | 25       | 40            | 50            | 82875,85       | 0,83273           | 114       | 717,4072     |
| 40       | 25       | 30            | 50            | 82875,85       | 0,83273           | 111       | 698,5281     |
| 40       | 25       | 25            | 50            | 82875,85       | 0,83273           | 109,5     | 689,0885     |
| 40       | 25       | 5             | 50            | 82875,85       | 0,83273           | 103,5     | 654,3302     |
| 40       | 25       | 5             | 45            | 82875,85       | 4,4967            | 102,25    | 643,4639     |
| 35       | 25       | 5             | 50            | 75029,43       | 5,2778            | 97        | 610,4254     |
| 35       | 25       | 5             | 55            | 75023,43       | 1,2778            | 98,25     | 618,2917     |
| 35       | 25       | 5             | 60            | 75020,99       | 0,83273           | 99,5      | 626,158      |
| 35       | 20       | 5             | 60            | 67825,25       | 0,83273           | 92        | 578,9602     |
| 35       | 15       | 5             | 60            | 60629,51       | 0,83273           | 84,5      | 531,7624     |
| 30       | 15       | 5             | 60            | 52782,05       | 4,2328            | 78        | 490,8576     |
| 30       | 15       | 5             | 65            | 52776,65       | 0,83273           | 79,25     | 498,7239     |
| 35       | 10       | 5             | 70            | 53429,77       | 0,83273           | 79,5      | 500,2971     |
| 35       | 10       | 5             | 65            | 53433,07       | 2,1338            | 78,25     | 492,4308     |
| 35       | 12       | 5             | 65            | 56310,06       | 0,83273           | 81,25     | 511,31       |
| 30       | 12       | 5             | 65            | 48461,15       | 2,78909           | 74,75     | 470,4052     |
| 30       | 14       | 5             | 65            | 51337,50       | 0,83273           | 77,75     | 489,2843     |
| 30       | 14       | 5             | 60            | 51345,05       | 6,3863            | 76,5      | 481,418      |
| 30       | 14       | 10            | 60            | 51345,05       | 6,3863            | 78        | 490,8576     |

Taula 8 Simulacions programa taskassignment2b

## 11. Annex B

### 11.1. MatrixLin03

```
% The aim of this program is to determine the following variables
in order to minimized the total cost
% Variables:
% x1 PVinstalled; x2 WTinstalled; x3 Pconvmax; x4 Ebatmax
% x5 Pconv x6 Ebat x7 Pun. The last 3 repeted per each hour.

% Loading the data and setting parameters
load dat1.mat
hours = 8760/2;
numvar = 4 + hours*3;

incT = 1;
Ppeak = 4000;
cost_PV= 1.3; % eur/w cost panel + inverter
cost_WT= 1.5; % eur/w cost wind
cost_convbat= 0.3; % eur/w cost battery converter
cost_bat= 0.25; % euros/wh cost battery

% Lower Bounds
% All positive except the power converter
lb = zeros(1, numvar);
for ii = 5:3:numvar
    lb(ii) = -Inf;
end

% Upper Bounds
ub = [];

% Linear Inequality
% Restriction on the power converter and the battery energy
A = zeros(hours*4,numvar);
b = zeros(1,hours*4);
for ii = 1:4:hours*4
    A([ii,ii+1],3) = [-1 -1];
end
for ii = 3:4:hours*4
    A([ii,ii+1],4) = [0.2 -1];
end
for ii = 1:1:hours
    A([4*(ii-1)+1, 4*(ii-1)+2], 4+3*(ii-1)+1) = [-1,1];
    A([4*(ii-1)+3, 4*(ii-1)+4], 4+3*(ii-1)+2) = [-1,1];
end

% Linear Equality
% Power Balance and definition of next state of the battery
Aeq = zeros(hours*2,numvar);
```

```

beq = zeros(1, hours*2);
for ii = 1:2:hours*2
    Aeq(ii, [1,2]) = [dat1(round(ii/2),1), dat1(round(ii/2),2)];
end
for ii=1:1:hours
    Aeq(ii*2-1, [5+3*(ii-1):7+3*(ii-1)]) = [-1 0 -1];
end
for ii = 1:1:hours
    if ii ==1
        Aeq(2, [4:6]) = [0.6 incT -1];
    else
        Aeq(ii*2, [ii*3:(ii+1)*3]) = [1 0 incT -1];
    end
end
for ii = 1:2:hours*2
    beq(ii) = dat1(round(ii/2),3)*Ppeak;
end

% Function to be minimized
f = zeros(1,numvar);
f([1,2,3,4]) = [cost_PV, cost_WT, cost_convbat, cost_bat];
[x, cost] = linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb,ub);

genPV = x(1)*dat1([1:hours],1);
genWT = x(2)*dat1([1:hours],2);
dload= dat1([1:hours],3)*Ppeak;

Pconv = x(5:3:numvar);
Ebat = x(6:3:numvar);
Pun = x(7:3:numvar);

Enetot=sum(dload);
lifetime=10; %years
lcoe= cost/(1e-6*lifetime*(8760/length(Ebat))*Enetot); % eur/MWh
lifetime

% Deviation between available generation and load, positive-
>curtailment, negative->load
% non supplied
Ptotal= (genPV+genWT-Pconv-dload);
etotcg= sum(max(0,Ptotal)); %Total curtailed generation; or
sum(Pun)
etotns= sum(max(0,-Ptotal)); %Total demand non-supplied

% It is unused more than what is generated?
B = genPV + genWT - Pun;
ws1 = [];
for ii = 1:hours
    if B(ii) < 0
        ws1 = [ws1;ii];
    end
end
end

```

```

% Is the power drawn from the battery at the same time it is
unused?
ws2 = [];
for ii = 1:hours
    if Pconv(ii)<0 & Pun(ii)~=0
        ws2 = [ws2;ii];
    end
end

% Is the power drawn from the battery while it is generated
sufficient to supply the load?
ws3 = [];
difference = genPV + genWT -dload;
for ii=1:hours
    if Pconv(ii)<0 & difference(ii)>0
        ws3 = [ws3; ii];
    end
end

display(['Ppeak = ' num2str(Ppeak*1e-3) ' kW'])
display(['PPV = ' num2str(x(1)*1e-3) ' kW'])
display(['PWT = ' num2str(x(2)*1e-3) ' kW'])
display(['Pconvmax = ' num2str(x(3)*1e-3) ' kW'])
display(['Ebatmax = ' num2str(x(4)*1e-3) ' kWh'])
display(['Unused power = ' num2str(etotcg*1e-3) ' kW'])
display(['Non supplied demand = ' num2str(etotns*1e-3) ' kW'])
display(['Cost = ' num2str(cost*1e-3) ' k€'])
display(['LCOE = ' num2str(lcoe) ' €/MWh'])

```



## 11.2. MatrixLin07

```
% The aim of this program is to determine the following variables
in order
% to minimized the total cost while preventing the unused power
exceeds the
% generation and minimizing the total unused power (= MatrixLin04
+ MatrixLin06)
% Variables:
% x1 PVinstalled; x2 WTinstalled; x3 Pconvmax; x4 Ebatmax
% x5 Pconv x6 Ebat x7 Pun. The last 3 repeted per each hour.

% Loading the data and setting parameters
load dat1.mat
hours = 8760/2;
numvar = 4 + hours*3;

incT = 1;
Ppeak = 4000;
cost_PV= 1.3; % eur/w cost panel + inverter
cost_WT= 1.5; % eur/w cost wind
cost_convbat= 0.3; % eur/w cost battery converter
cost_bat= 0.25; % euros/wh cost battery

% Lower Bounds
% All positive except the power converter
lb = zeros(1, numvar);
lb(5:3:numvar) = -Inf;

% Upper Bounds
ub = [];

% Linear Inequality
% Restriction on the power converter and the battery energy
A = zeros(hours*5,numvar);
b = zeros(1, hours*5);
for ii = 1:5:hours*5
    A([ii,ii+1],3) = [-1 -1];
end

for ii = 3:5:hours*5
    A([ii,ii+1],4) = [0.2 -1];
end

for ii = 1:1:hours
    A([5*(ii-1)+1, 5*(ii-1)+2], 4+3*(ii-1)+1) = [-1,1];
    A([5*(ii-1)+3, 5*(ii-1)+4], 4+3*(ii-1)+2) = [-1,1];
end

% New restriction on the Pun. It cannot be higher than generation
for ii = 5:5:hours*5
    A(ii, [1,2]) = [-dat1((ii/5),1),-dat1((ii/5),2)];
end
```

```

s = -2;
for ii = 5:5:hours*5
    A(ii,ii - s)= 1;
    s = s + 2;
end
%
% Linear Equality
% Power Balance and definition of next state of the battery
Aeq = zeros(hours*2,numvar);
beq = zeros(1,hours*2);
for ii = 1:2:hours*2
    Aeq(ii, [1,2]) = [dat1(round(ii/2),1),dat1(round(ii/2),2)];
end
for ii=1:1:hours
    Aeq(ii*2-1,[5+3*(ii-1):7+3*(ii-1)])= [-1 0 -1];
end
for ii = 1:1:hours
    if ii ==1
        Aeq(2, [4:6]) = [0.6 incT -1];
    else
        Aeq(ii*2, [ii*3:(ii+1)*3])= [1 0 incT -1];
    end
end
for ii = 1:2:hours*2
    beq(ii) = dat1(round(ii/2),3)*Ppeak;
end

% Function to be minimized
f = zeros(1,numvar);
f([1,2,3,4]) = [cost_PV, cost_WT, cost_convbat, cost_bat];
f([7:3:numvar]) = 1e-6;

[x, fres] = linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb,ub);
cost = f(1:4)*x(1:4);

genPV = x(1)*dat1([1:hours],1);
genWT = x(2)*dat1([1:hours],2);
dload= dat1([1:hours],3)*Ppeak;

Pconv = x(5:3:numvar);
Ebat = x(6:3:numvar);
Pun = x(7:3:numvar);

Enetot=sum(dload);
lifetime=10; %years
lcoe= cost/(1e-6*lifetime*(8760/length(Ebat))*Enetot); % eur/MWh
lifetime

% Deviation between available generation and load, positive-
>curtailment, negative->load

```

```

% non supplied
Ptotal= (genPV+genWT-Pconv-dload);
etotcg= sum(max(0,Ptotal)); %Total curtailed generation; or
sum(Pun)
etotns= sum(max(0,-Ptotal)); %Total demand non-supplied

% It is unused more than what is generated?
B = genPV + genWT - Pun;
ws1 = [];
for ii = 1:hours
    if B(ii) < 0
        ws1 = [ws1;ii];
    end
end

% Is the power drawn from the battery at the same time it is
unused?
ws2 = [];
for ii = 1:hours
    if Pconv(ii)<0 && Pun(ii)~=0
        ws2 = [ws2;ii];
    end
end

% Is the power drawn from the battery while it is generated
sufficient to supply the load?
ws3 = [];
difference = genPV + genWT -dload;
for ii=1:hours
    if Pconv(ii)<0 & difference(ii)>0
        ws3 = [ws3; ii];
    end
end

display(['Ppeak = ' num2str(Ppeak*1e-3) ' kW'])
display(['PPV = ' num2str(x(1)*1e-3) ' kW'])
display(['PWT = ' num2str(x(2)*1e-3) ' kW'])
display(['Pconvmax = ' num2str(x(3)*1e-3) ' kW'])
display(['Ebatmax = ' num2str(x(4)*1e-3) ' kWh'])
display(['Unused power = ' num2str(etotcg*1e-3) ' kW'])
display(['Non supplied demand = ' num2str(etotns*1e-3) ' kW'])
display(['Function result = ' num2str(fres*1e-3) ' k€'])
display(['Cost = ' num2str(cost*1e-3) ' k€'])
display(['LCOE = ' num2str(lcoe) ' €/MWh'])

```

### 11.3. Altres versions desenvolupades

|             | PPV<br>(kW) | PWT<br>(kW) | Pconvmax<br>(kW) | Ebatmax<br>(kWh) | Pun<br>(kW) | Cost<br>(k€) | LCOE<br>(€/MWh) |
|-------------|-------------|-------------|------------------|------------------|-------------|--------------|-----------------|
| MatrixLin03 | 12,26       | 4,44        | 6,69             | 104,58           | 5483,17     | 50,75        | 324,40          |
| MatrixLin04 | 12,26       | 4,44        | 6,69             | 104,58           | 5483,74     | 50,75        | 324,40          |
| MatrixLin05 | 12,26       | 4,44        | 6,69             | 104,58           | 5495,35     | 50,75        | 324,40          |
| MatrixLin06 | 12,26       | 4,44        | 6,69             | 104,58           | 5411,69     | 50,75        | 324,40          |
| MatrixLin07 | 12,26       | 4,44        | 6,69             | 104,58           | 5411,69     | 50,75        | 324,40          |

Taula 7 Comparativa entre el dimensionat i resultats pels diferents programes desenvolupats en mig any

Tal i com es veu a la taula, els resultats numèrics de les quatre variables a dimensionar i per tant el cost i el LCOE és el mateix. El que sobre tot canvia es la gestió de l'emmagatzematge d'energia a la bateria juntament amb la potència llençada. Això es veu sobretot en els casos 1,2,3 descrits a l'apartat 7.4.

MatrixLin04 inclou la imposició que no es pot llençar més de el qual es genera. S'eliminen els casos 1, però augmenta el cas 2 fins a 874. La gràfica de la potència difereix gaire respecte MatrixLin03. No permet simular tot un any.

A MatrixLin05 s'elimina la potència no utilitzada com a variable del model. El SoC de la bateria encara tendeix al llindar inferior i a més, la potència no utilitzada augmenta. També els casos 2 fins a 933.

La funció a minimitzar de MatrixLin06 té  $10^{-6}$  multiplicant la potència no utilitzada per cada hora. D'aquesta manera no només disminueix la potència no utilitzada, sinó que també els casos 2. Segueixen havent casos 1.

La versió que s'escull com a definitiva és MatrixLin07, una síntesi entre els avantatges de MatrixLin04 i MatrixLin07 que fan que s'assembli més a un cas real. De tota manera, els casos 2 augmenten fins a 1238. Per això s'inclou el convertidor en una versió posterior.

## 11.4.MatrixLin71

```
% The aim of this program is to determine the following variables
in order
% to minimized the total cost while preventing the unused power
exceeds the
% generation and minimizing the total unused power (= MatrixLin04
+ MatrixLin06)
% Variables:
% x1 PVinstalled; x2 WTinstalled; x3 Pconvmax; x4 Ebatmax
% x5 Pconvp x6 Pconvn x7 Ebat x8 Pun. The last 4 repeted per each
hour.
%
% It is included the converter efficiency

% Loading the data and setting parameters
load dat1.mat
hours = 8760/2;
numvar = 4 + hours*4;
efficiency = 0.9; %

incT = 1;
Ppeak = 4000;
cost_PV= 1.3; % eur/w cost panel + inverter
cost_WT= 1.5; % eur/w cost wind
cost_convbat= 0.3; % eur/w cost battery converter
cost_bat= 0.25; % euros/kwh cost battery

% Lower Bounds
% All positive except the power converter
lb = zeros(1, numvar);
for ii = 6:4:numvar
    lb(ii) = -Inf;
end

% Upper Bounds
ub = Inf*ones(1, numvar);
for ii = 6:4:numvar
    ub(ii) = 0;
end

% Linear Inequality
% Restriction on the power converter and the battery energy
A = zeros(hours*5,numvar);
b = zeros(1, hours*5);
for ii = 1:5:hours*5
    A([ii,ii+1],3) = [-1 -1];
end
for ii = 3:5:hours*5
    A([ii,ii+1],4) = [0.2 -1];
end
for ii = 1:1:hours
```

```

        A(5*(ii-1)+1, 4+4*(ii-1)+1) = 1;
        A(5*(ii-1)+2, 4+4*(ii-1)+2) = -1;
        A([5*(ii-1)+3, 5*(ii-1)+4], 4+4*(ii-1)+3) = [-1,1];
    end

    % New restriction on the Pun, it cannot be higher than generation
    for ii = 5:5:hours*5
        A(ii, [1,2]) = [-dat1((ii/5),1),-dat1((ii/5),2)];
    end

    s = -3;
    for ii = 5:5:hours*5
        A(ii,ii - s)= 1;
        s = s + 1;
    end
    %

    % Linear Equality
    % Power Balance and battery's next state definition
    Aeq = zeros(hours*2,numvar);
    beq = zeros(1,hours*2);
    for ii = 1:2:hours*2
        Aeq(ii, [1,2]) = [dat1(round(ii/2),1),dat1(round(ii/2),2)];
    end
    for ii=1:1:hours
        Aeq(2*ii-1,[5+4*(ii-1):8+4*(ii-1)])= [-1 -1 0 -1];
    end
    for ii = 1:1:hours
        if ii ==1
            Aeq(2, [4:7]) = [0.6 efficiency*incT (1/efficiency)*incT -
1];
        else
            Aeq(ii*2, [4*ii-1:4*ii+3])= [1 0 efficiency*incT
(1/efficiency)*incT -1];
        end
    end
    for ii = 1:2:hours*2
        beq(ii) = dat1(round(ii/2),3)*Ppeak;
    end

    % % Function to be minimized
    f = zeros(1,numvar);
    f([1,2,3,4]) = [cost_PV, cost_WT, cost_convbat, cost_bat];
    f([8:4:numvar]) = 1e-6;

    [x, fres] = linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb,ub);
    cost = f(1:4)*x(1:4);

    genPV = x(1)*dat1([1:hours],1);
    genWT = x(2)*dat1([1:hours],2);
    dload= dat1([1:hours],3)*Ppeak;

```

```

Pconv = ones(1, hours)';
Pconvp = x(5:4:numvar);
Pconvn = x(6:4:numvar);

for ii= 1:1:hours
    if Pconvp(ii) ~= 0 & Pconvn(ii) == 0
        Pconv(ii) = Pconvp(ii);
    elseif Pconvp(ii) == 0 & Pconvn(ii) ~=0
        Pconv(ii) = Pconvn(ii);
    else
        Pconv(ii) = Pconvp(ii)+Pconvn(ii);
    end
end

Ebat = x(7:4:numvar);
Pun = x(8:4:numvar);

Enetot=sum(dload);
lifetime=10; %years
lcoe= cost/(1e-6*lifetime*(8760/length(Ebat))*Enetot); % eur/MWh
lifetime

% Deviation between available generation and load, positive-
>curtailment, negative->load
% non supplied
Ptotal= (genPV+genWT-Pconv-dload);
etotcg= sum(max(0,Ptotal)); %Total curtailed generation; or
sum(Pun)
etotns= sum(max(0,-Ptotal)); %Total demand non-supplied

% It is unused more than what is generated?
B = genPV + genWT - Pun;
ws1 = [];
for ii = 1:hours
    if B(ii) < 0
        ws1 = [ws1;ii];
    end
end

% Is the power drawn from the battery at the same time it is
unused?
ws2 = [];
for ii = 1:hours
    if Pconv(ii)<0 & Pun(ii)~=0
        ws2 = [ws2;ii];
    end
end

% Is the power drawn from the battery while it is generated
sufficient to
% supply the load?
ws3 =[];

```

```
difference = genPV + genWT -dload;
for ii=1:hours
    if Pconv(ii)<0 & difference(ii)>0
        ws3 = [ws3; ii];
    end
end

display(['Ppeak = ' num2str(Ppeak*1e-3) ' kW'])
display(['PPV = ' num2str(x(1)*1e-3) ' kW'])
display(['PWT = ' num2str(x(2)*1e-3) ' kW'])
display(['Pconvmax = ' num2str(x(3)*1e-3) ' kW'])
display(['Ebatmax = ' num2str(x(4)*1e-3) ' kWh'])
display(['Unused power = ' num2str(etotcg*1e-3) ' kW'])
display(['Non supplied demand = ' num2str(etotns*1e-3) ' kW'])
display(['Function result = ' num2str(fres*1e-3) ' k€'])
display(['Cost = ' num2str(cost*1e-3) ' k€'])
display(['LCOE = ' num2str(lcoe) ' €/MWh'])
display(['Efficiency = ' num2str(efficiency*100) '%'])
```



## 12. Annex C

Evolució de la Potència del convertidor, energia de la bateria i generació i demanda en mig any per un  $\eta=80$

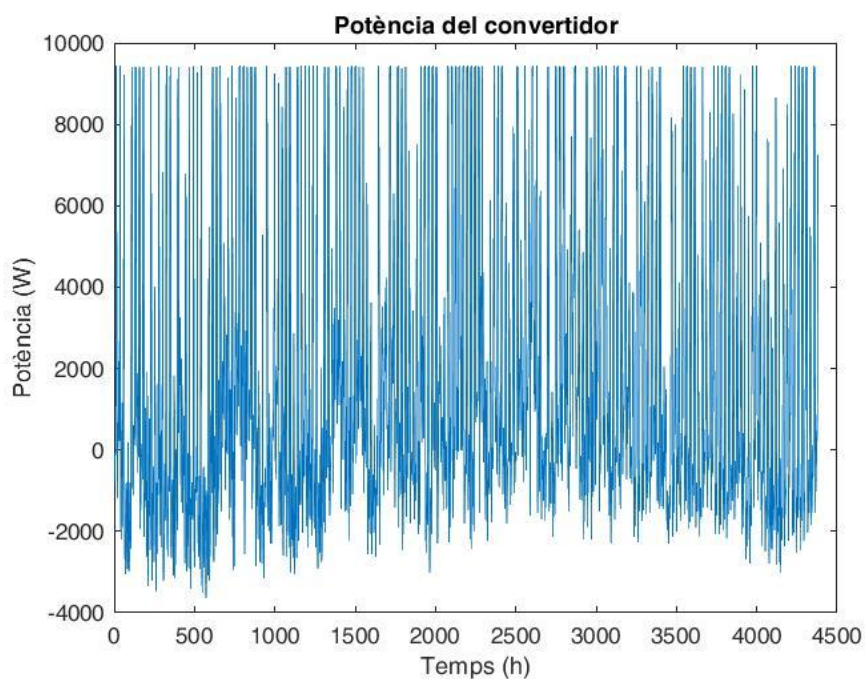


Figura 24 Potència del convertidor en mig any per un rendiment del 80 %

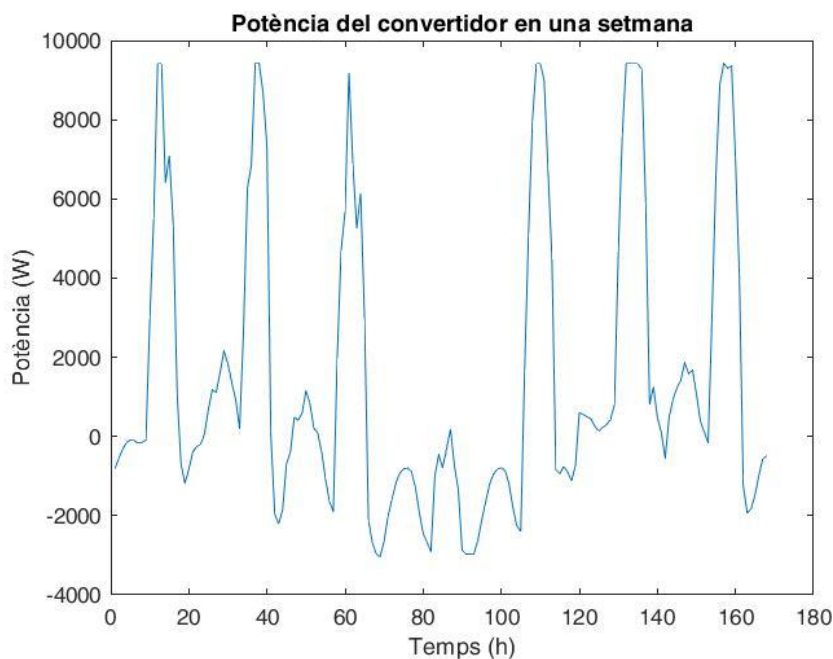


Figura 25 Potència del convertidor durant la primera setmana per un rendiment del 80 %

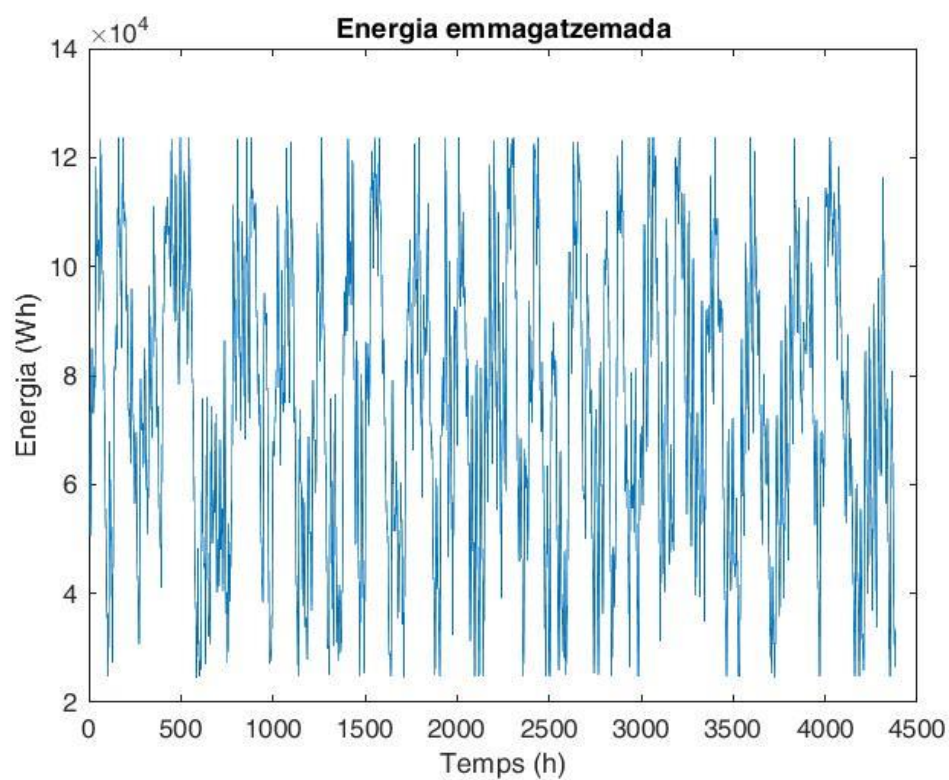


Figura 26 Energia de la bateria en mig any per un rendiment del 80 %

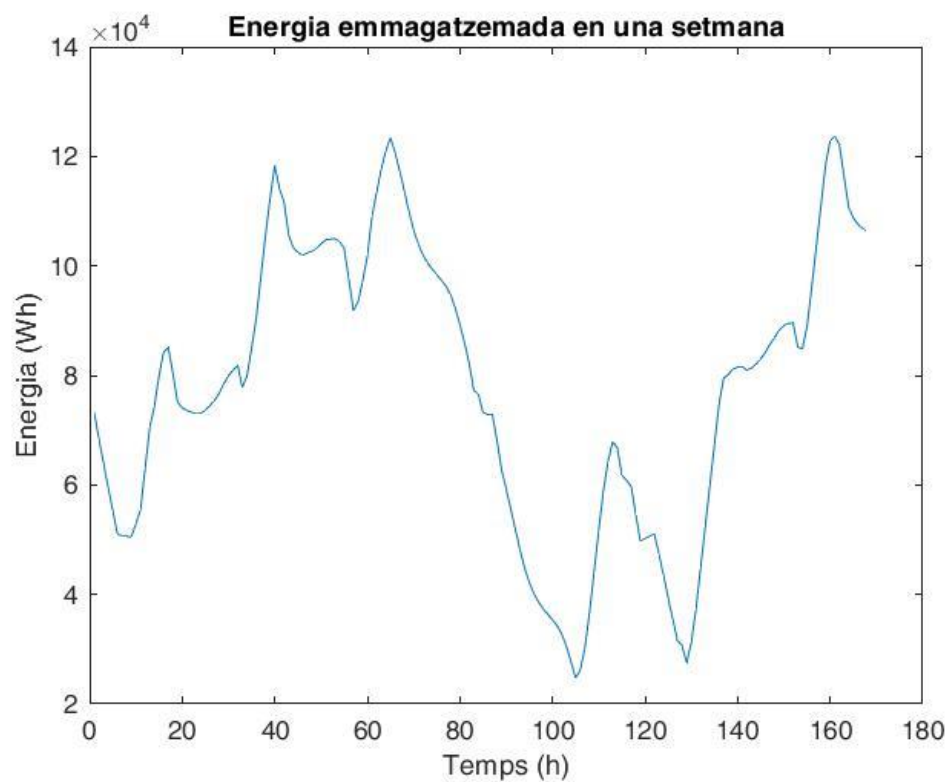


Figura 27 Energia de la bateria durant la primera setmana per un rendiment del 80 %

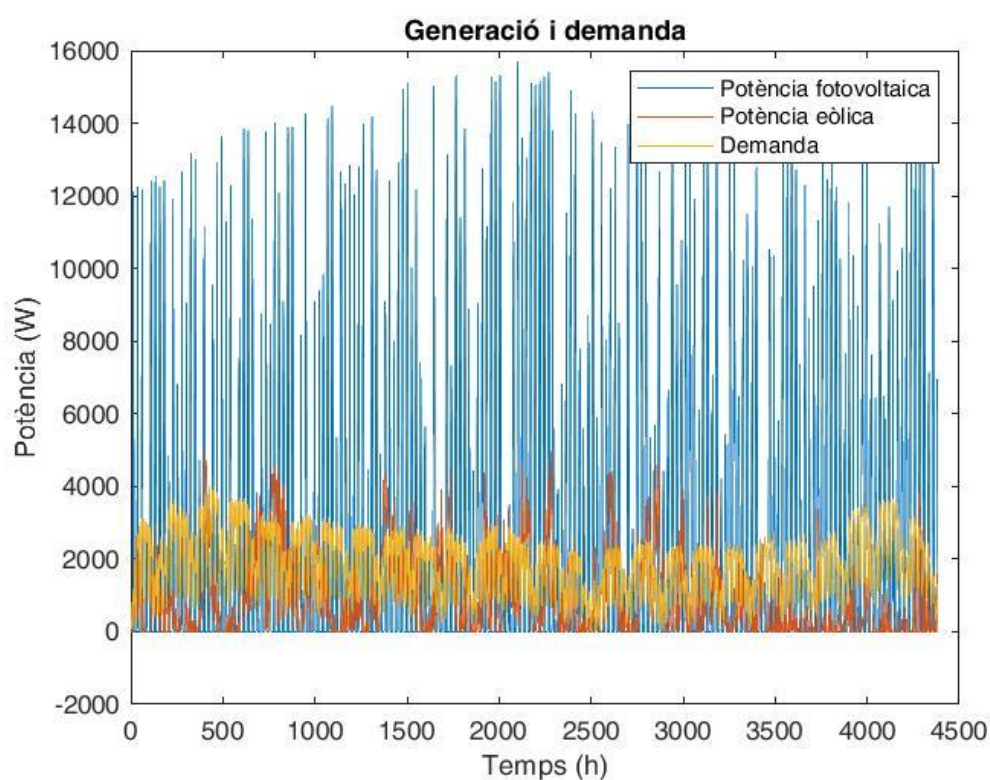


Figura 28 Generació i demanda en mig any per un rendiment del 80 %

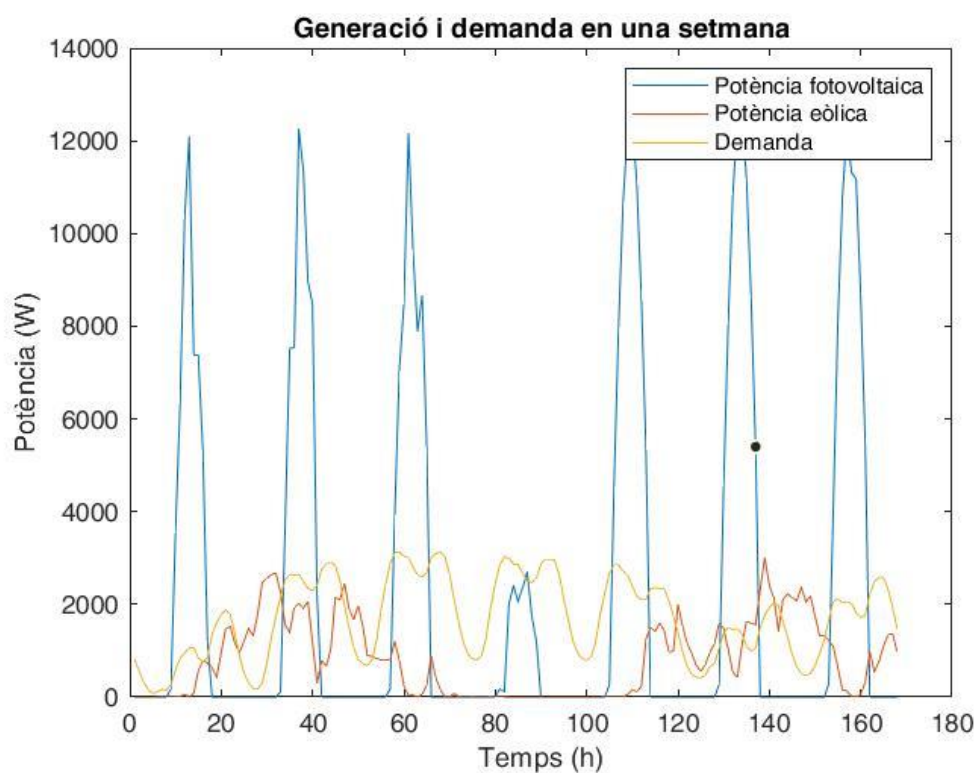


Figura 29 Generació i demanda durant la primera setmana per un rendiment del 80 %

## 13. Annex D

### 13.1. Descripció matemàtica del model

Com a alternativa a MatrixLin71 s'estudiarà MatrixLin31, que no té en compte a la funció objectiu la minimització de la potència llençada i amb la possibilitat de llençar més potència de la que es genera. Aquesta, és part de la que s'extreu de la bateria.

$$f(x) = cost_{PV} \cdot x_1 + cost_{WT} \cdot x_2 + cost_{convbat} \cdot x_3 + cost_{bat} \cdot x_4 \quad (53)$$

$$a(t)x_1 + b(t)x_2 - C(t) = Pconv(t) + Pun(t) \quad (54)$$

$$-x_3 \leq Pconv(t) \leq x_3 \quad (55)$$

$$Pbat = \begin{cases} \eta Pconv(t) & \text{si } Pconv \geq 0 \\ \frac{1}{\eta} Pconv(t) & \text{si } Pconv \leq 0 \end{cases} \quad (56)$$

$$Ebat(t) = Ebat(t-1) + incT \cdot Pbat(t) \quad (57)$$

$$0,2 \cdot x_4 \leq Ebat(t) \leq x_4 \quad (58)$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, Pun(t), E(t) \geq 0 \quad (59)$$

### 13.2. Resultats

A continuació es mostren els resultats de MatrixLin31 per diferents valors de rendiment per mig any.

|                  | PPV<br>(kW) | PWT<br>(kW) | Pconvmax<br>(kW) | Ebatmax<br>(kWh) | Pun<br>(kW) | Cost<br>(k€) | LCOE<br>(€/MWh) |
|------------------|-------------|-------------|------------------|------------------|-------------|--------------|-----------------|
| $\eta = 100\%$   | 12,26       | 4,44        | 6,69             | 104,58           | 5483,17     | 50,75        | 324,40          |
| $\eta = 99,99\%$ | 12,26       | 4,44        | 6,69             | 104,59           | 5496,05     | 50,75        | 324,42          |
| $\eta = 95\%$    | 12,69       | 4,76        | 7,10             | 108,67           | 5846,34     | 52,94        | 338,41          |
| $\eta = 90\%$    | 13,51       | 4,83        | 7,83             | 113,28           | 6260,59     | 55,476       | 354,62          |
| $\eta = 85\%$    | 14,51       | 4,92        | 8,51             | 118,09           | 6795,69     | 58,31        | 372,72          |
| $\eta = 80\%$    | 15,70       | 4,97        | 9,42             | 123,68           | 7405,1513   | 61,62        | 393,88          |

Taula 8 Comparativa del dimensionat per diferents rendiments en mig any

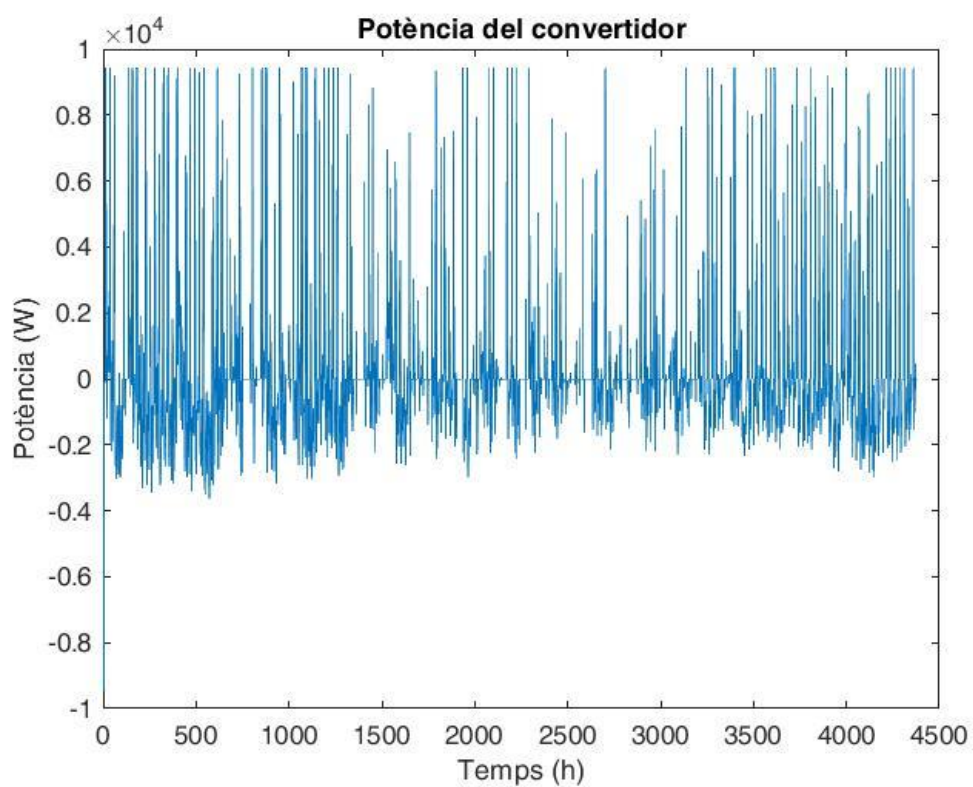


Figura 30 Potència del convertidor en mig any per un rendiment del 80 %

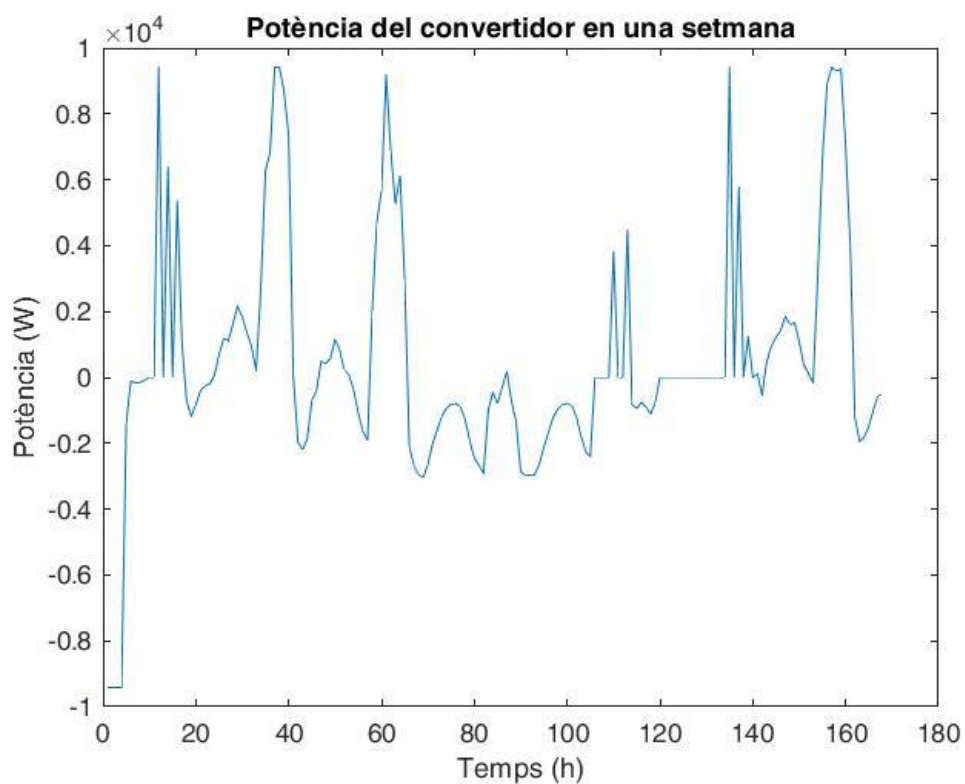


Figura 31 Potència del convertidor durant la primera setmana per un rendiment del 80 %



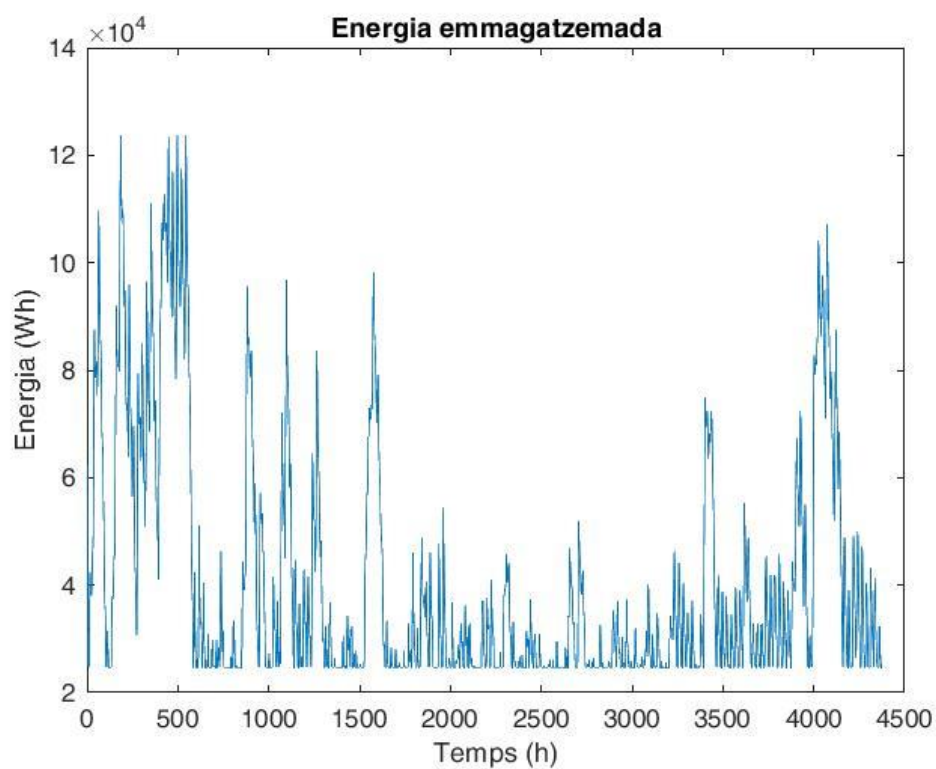


Figura 32 Energia de la bateria en mig any per un rendiment del 80 %

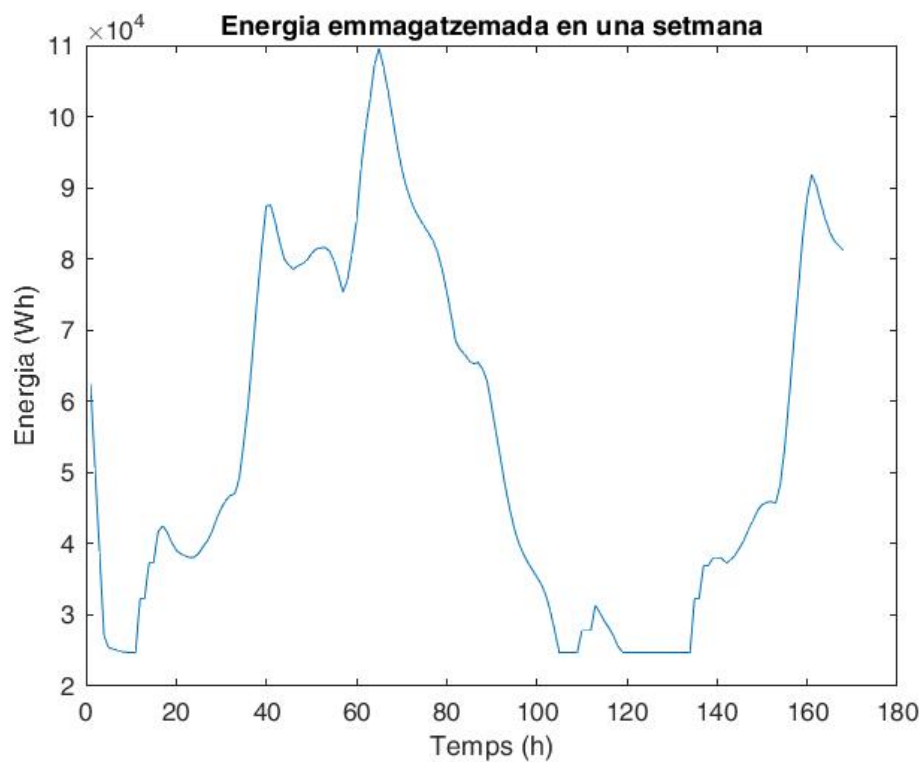


Figura 33 Energia de la bateria durant la primera setmana per un rendiment del 80 %

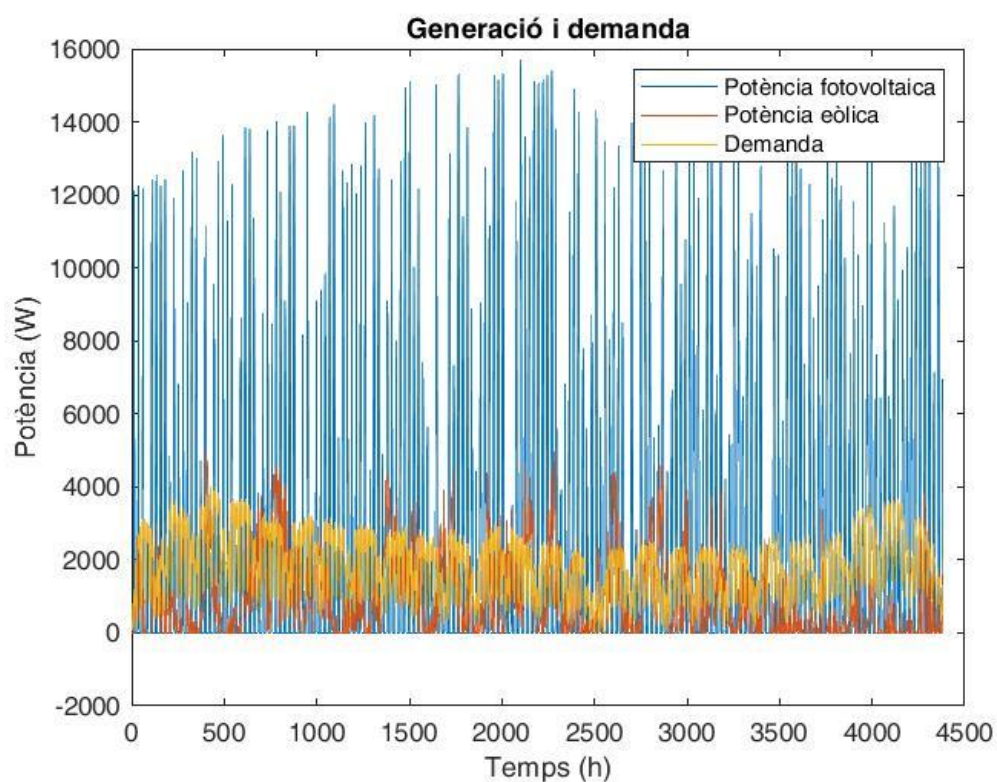


Figura 34 Generació i demanda en mig any per un rendiment del 80 %

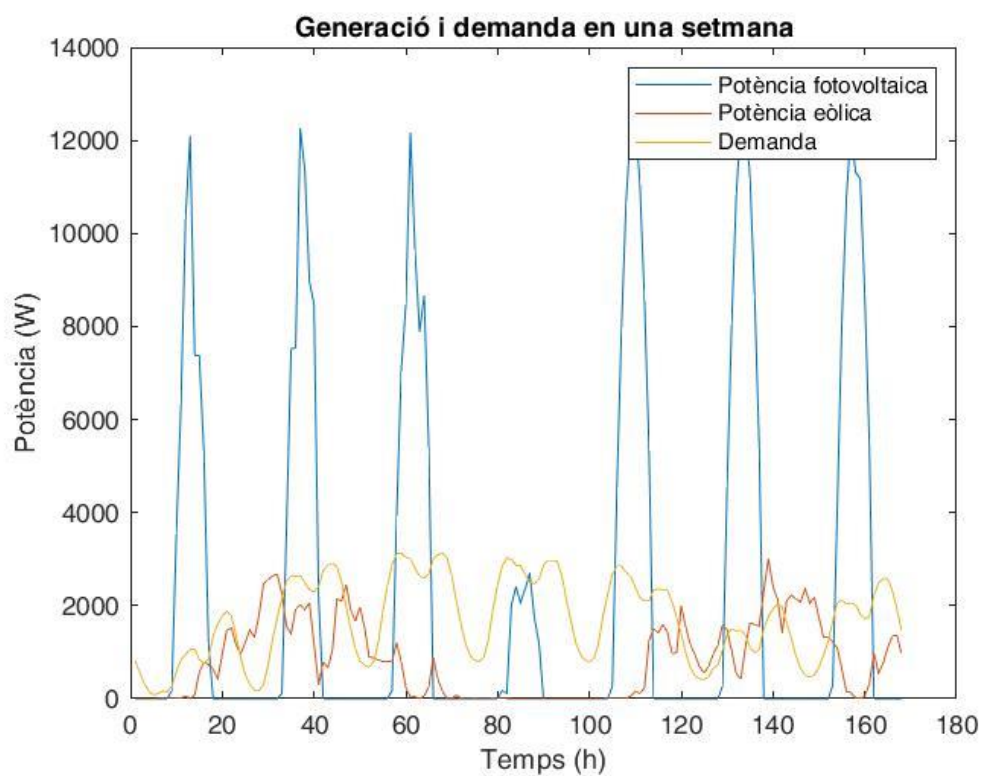


Figura 35 Generació i demanda durant la primera setmana per un rendiment del 80 %

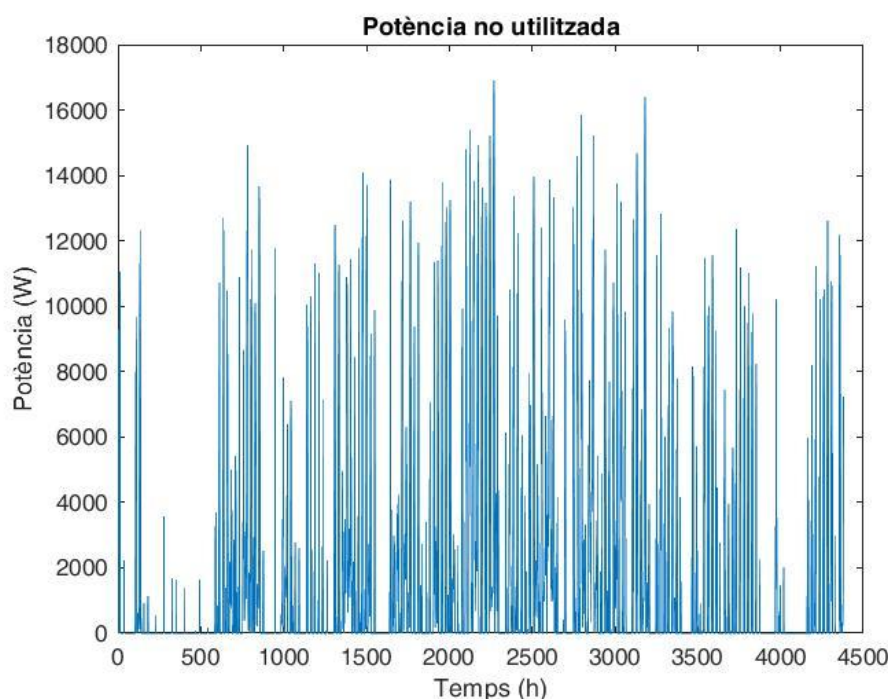


Figura 36 Potència no utilitzada en mig any per un rendiment del 80 %

Aquesta versió permet que es llenci més potència de la que es genera. En sis hores ocorre per  $\eta = 80\%$ .

Comparant la Taula 8 del dimensionat de MatrixLin31 amb la Taula 6 del dimensionat de MatrixLin71 no hi ha diferència, exceptuant la potència llençada, que en comptes de disminuir, augmenta. Això és degut a que el terme de la potència llençada de la funció objectiu no hi és. Aquest fet també es veu reflectit al SoC de la bateria, que està constantment vora el llindar inferior. Tot i que no és semblant a la realitat, que estaria vora el llindar superior, el balanç d'energia sí el fa correctament, doncs en cap hora hi ha potència de sortida i entrada a la vegada en el convertidor.



### 13.3.MatrixLin31

```
% The aim of this program is to determine the following variables
in order to minimized the total cost
% Variables:
% x1 PVinstalled; x2 WTinstalled; x3 Pconvmax; x4 Ebatmax
% x5 Pconv x6 Ebat x7 Pun. The last 3 repeted per each hour.
%
% It is included the converter efficiency

% Loading the data and setting parameters
load dat1.mat
hours = 8760/2;
numvar = 4 + hours*4;
efficiency = 0.8; %

incT = 1;
Ppeak = 4000;
cost_PV= 1.3; % eur/w cost panel + inverter
cost_WT= 1.5; % eur/w cost wind
cost_convbat= 0.3; % eur/w cost batteryconverter
cost_bat= 0.25; % euros/kwh cost battery

% Lower Bounds
% All positive except the power converter
lb = zeros(1, numvar);
for ii = 6:4:numvar
    lb(ii) = -Inf;
end

% Upper Bounds
ub = Inf*ones(1, numvar);
for ii = 6:4:numvar
    ub(ii) = 0;
end

% Linear Inequality
% Restriction on the power converter and the battery energy
A = zeros(hours*4,numvar);
b = zeros(1, hours*4);
for ii = 1:4:hours*4
    A([ii,ii+1],3) = [-1 -1];
end
for ii = 3:4:hours*4
    A([ii,ii+1],4) = [0.2 -1];
end
for ii = 1:1:hours
    A(4*(ii-1)+1, 4+4*(ii-1)+1) = 1;
    A(4*(ii-1)+2, 4+4*(ii-1)+2) = -1;
    A([4*(ii-1)+3, 4*(ii-1)+4], 4+4*(ii-1)+3) = [-1,1];
end
```

```

% Linear Equality
% Power Balance and battery's next state definition
Aeq = zeros(hours*2,numvar);
beq = zeros(1,hours*2);
for ii = 1:2:hours*2
    Aeq(ii, [1,2]) = [dat1(round(ii/2),1),dat1(round(ii/2),2)];
end
for ii=1:1:hours
    Aeq(2*ii-1,[5+4*(ii-1):8+4*(ii-1)])= [-1 -1 0 -1];
end
for ii = 1:1:hours
    if ii ==1
        Aeq(2, [4:7]) = [0.6 efficiency*incT (1/efficiency)*incT -
1];
    else
        Aeq(ii*2, [4*ii-1:4*ii+3])= [1 0 efficiency*incT
(1/efficiency)*incT -1];
    end
end
for ii = 1:2:hours*2
    beq(ii) = dat1(round(ii/2),3)*Ppeak;
end

% Function to be minimized
f = zeros(1,numvar);
f([1,2,3,4]) = [cost_PV, cost_WT, cost_convbat, cost_bat];
[x, cost] = linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb,ub);

genPV = x(1)*dat1([1:hours],1);
genWT = x(2)*dat1([1:hours],2);
dload= dat1([1:hours],3)*Ppeak;

Pconv = ones(1,hours)';
Pconvp = x(5:4:numvar);
Pconvn = x(6:4:numvar);

for ii= 1:1:hours
    if Pconvp(ii) ~= 0 & Pconvn(ii) == 0
        Pconv(ii) = Pconvp(ii);
    elseif Pconvp(ii) == 0 & Pconvn(ii) ~=0
        Pconv(ii) = Pconvn(ii);
    else
        Pconv(ii) = Pconvp(ii) + Pconvn(ii);
    end
end

Ebat = x(7:4:numvar);
Pun = x(8:4:numvar);

Enetot=sum(dload);
lifetime=10; %years

```

```

lcoe= cost/(1e-6*lifetime*(8760/length(Ebat))*Enetot); % eur/MWh
lifetime

% Deviation between available generation and load, positive-
>curtailment, negative->load
% non supplied
Ptotal= (genPV+genWT-Pconv-dload);
etotcg= sum(max(0,Ptotal)); %Total curtailed generation; or
sum(Pun)
etotns= sum(max(0,-Ptotal)); %Total demand non-supplied

% It is unused more than what is generated?
B = genPV + genWT - Pun;
ws1 = [];
for ii = 1:hours
    if B(ii) < 0
        ws1 = [ws1;ii];
    end
end

% Is the power drawn from the battery at the same time it is
unused?
ws2 = [];
for ii = 1:hours
    if Pconv(ii)<0 & Pun(ii)~=0
        ws2 = [ws2;ii];
    end
end

% Is the power drawn from the battery while it is generated
sufficient to
% supply the load?
ws3=[];
difference = genPV + genWT -dload;
for ii=1:hours
    if Pconv(ii)<0 & difference(ii)>0
        ws3 = [ws3; ii];
    end
end

display(['Ppeak = ' num2str(Ppeak*1e-3) ' kW'])
display(['PPV = ' num2str(x(1)*1e-3) ' kW'])
display(['PWT = ' num2str(x(2)*1e-3) ' kW'])
display(['Pconv = ' num2str(x(3)*1e-3) ' kW'])
display(['Ebat = ' num2str(x(4)*1e-3) ' kWh'])
display(['Unused power = ' num2str(etotcg*1e-3) ' kW'])
display(['Non supplied demand = ' num2str(etotns*1e-3) ' kW'])
display(['Cost = ' num2str(cost*1e-3) ' k€'])
display(['LCOE = ' num2str(lcoe) ' €/MWh'])
display(['Efficiency = ' num2str(efficiency*100) '%'])

```